Energia sostenibile — senza aria fritta

Versione 3.5.2. 27 luglio 2014.
This Cover-sheet must not appear in the printed book.
high-resolution edition.

Energia sostenibile — senza aria fritta

Energia sostenibile — senza aria fritta

David JC MacKay

UIT
CAMBRIDGE, ENGLAND

Pubblicato per la prima volta nel Regno Unito
nel 2009.
UIT Cambridge Ltd.
PO Box 145
Cambridge
CB4 1GQ
England

Tel: +44 1223 302 041
Web: www.uit.co.uk

Copyright © 2009 David JC MacKay
All rights reserved.

ISBN 978-0-9544529-3-3 (paperback)
ISBN 978-1-906860-01-1 (hardback)

The right of David JC MacKay to be identified as the author of this work has been asserted by him in accordance with the Copyright, Designs and Patents Act 1988.

While this publication intends to provide accurate and authoritative information in regard to the subject matter covered, neither the publisher nor the author makes any representation, express or implied, with regard to the accuracy of information contained in this book, nor do they accept any legal responsibility or liability for any errors or omissions that may be made. This work is supplied with the understanding that UIT Cambridge Ltd and its authors are supplying information, but are not attempting to render engineering or other professional services. If such services are required, the assistance of an appropriate professional should be sought.

Many of the designations used by manufacturers and sellers to distinguish their products are claimed as trade-marks. UIT Cambridge Ltd acknowledges trademarks as the property of their respective owners.

10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

3.5.2

A quelli che non avranno il vantaggio
di accedere a riserve di energia
accumulate nel corso di due miliardi di anni

Prefazione alla prima edizione italiana

I vari capitoli del libro che vi accingete a leggere contengono la più completa raccolta di tutto quello che deve essere considerato in uno studio sul consumo e sulla produzione di energia sostenibile. Fin da subito vi troverete stimolati ad applicare quanto esposto alla vostra realtà così come l'autore, il prof. David MacKay dell'Università di Cambridge, fa nel corso del libro con esempi che attengono in un primo tempo alla sua sfera personale e al Regno Unito e poi all'Europa e al resto del mondo.

Alla fine della lettura si riuscirà ad arrivare a rispondere in maniera quantitativa e ragionata a domande come: "Se siamo il Paese del Sole quanta superficie dovrebbe essere coperta da pannelli fotovoltaici per produrre il fabbisogno energetico totale dell'Italia?" E ancora, "Se, alla fine di giugno dell'anno 2013, la regione Puglia ha installato 2095,6 MW di potenza eolica, quanta superficie di quella regione si può stimare sia occupata da turbine eoliche?" Oppure, "Un giornale che si vanta di riportare i fatti parla di un inventore che con una semplice modifica alla trasmissione dell'auto permette di dimezzare il consumo di carburante: è plausibile tutto ciò o forse al giornalista non farebbe male la lettura di questo libro per contestualizzare certe affermazioni?"

Come scrive MacKay "questo libro non si fa paladino di un piano energetico o di una tecnologia in particolare; piuttosto, cerca di individuare quali sono i mattoncini elementari della scatola del Lego, e l'ordine di grandezza associato ad ognuno di questi, in maniera che possiate arrivare da soli alle vostre conclusioni su quale piano possa assicurare l'equilibrio tra il consumo e la produzione di energia sostenibile e fare davvero la differenza". In questo modo non solo troverete utili considerazioni sui principi guida in base ai quali dovrebbero essere formulati i piani energetici continentali, nazionali, regionali, comunali e perfino familiari tenendo conto delle caratteristiche geografiche del Bel Paese, ma anche, su come migliorare i nostri comportamenti e stili di vita. Questi sì, come si scoprirà leggendo, molto simili a quelli dei cittadini britannici. In questo modo vi sentirete parte attiva del cambiamento di rotta che s'impone alla nostra società e che ci indica molto chiaramente MacKay già dal primo capitolo: l'uscita definitiva dalla dipendenza dai combustibili di origine fossile è un imperativo non più eludibile.

Data l'importanza della posta in gioco, gli autori della traduzione italiana di "Energia sostenibile senza aria fritta", Paolo Errani, Simone Gallarini e il sottoscritto, hanno deciso di impegnarsi volontariamente, investendo una parte considerevole del proprio tempo. Speriamo di avere svolto questo compito nella maniera più fedele possibile agli intenti e allo spirito dell'autore e di poter far nascere in chi legge l'entusiasmo per dire di sì a un futuro sostenibile, non solo a parole, ma nei fatti e nei comportamenti che faranno la differenza.

Figura 1. Centrale geotermica nei pressi di Larderello (PI). In toscana la potenza geotermica installata è di 723 MW. Foto di Alessandro Pastore.

Figura 2. Parco eolico a Frigento (AV) da 14 MW. Foto di Fiore S. Barbato, http://www.flickr.com/

Nel caso ci fossero sfuggite delle imperfezioni o errori, all'indirizzo email: energia.senzaariafritta@gmail.com, saremo ben lieti di riceverne segnalazione. Il libro in italiano può essere scaricato liberamente da internet all'indirizzo http://www.withouthotair.com/translations.html.

Infine, un lavoro così importante di traduzione non avrebbe visto la luce senza il sostegno e l'aiuto anche di altre persone che qui vogliamo ringraziare: il p.i. Enrico Zini, la dott.ssa di ricerca Chiara Petrone, la dott.ssa di ricerca Valentina Rossi, l'ing. Xavier Oca, l'ing. Lorenzo Siciliano, l'ing. Davide Kleiner, il prof. Gianni Lorenzoni, il prof. Simone Ferriani, il prof. Alberto Marcone e la prof.ssa Ersilia Francesca.

Buona lettura.

Alessandro Pastore

Figura 3. Parco Fotovoltatico da 450 kWp a Casalnoceto (AL) sui terreni dell'azienda agricola Stringa. Foto di Maurizio Pucci, http://www.flickr.com/

Figura 4. Diga del Molato (PC) in Val Tidone da 30 milioni kWh/anno. Foto di Maurizio Pucci, http://www.flickr.com/

Prefazione

Perchè questo libro?

L'obiettivo è quello di diminuire i livelli di emissione di chiacchiere sull'energia sostenibile nel Regno Unito. Tutti dicono che è importante smettere di usare combustibili fossili e siamo incoraggiati a "fare la differenza", ma molte delle azioni a cui siamo chiamati hanno un impatto modesto.

Il livello di produzione di chiacchiere è alto perchè si cerca di fare colpo sulla parte emotiva delle persone (per esempio quando si parla di parchi eolici o energia nucleare) e nessuno parla dei numeri. O se questi ultimi sono menzionati, lo sono con lo scopo di farli apparire grandi, di impressionare e di guadagnare dei punti nelle discussioni, piuttosto che aiutare un sereno e ragionato confronto.

Questo libro parla solo di numeri. L'obiettivo è quello di guidare il lettore verso delle azioni che possono realmente fare la differenza, cercando così, da un lato, di arrivare a definire delle politiche energetiche che possono bilanciare i consumi e la produzione di energia, e, dall'altro, evitare le trappole di una dialettica non costruttiva.

Il libro si può consultare liberamente

L'autore non ha scritto questo libro con l'intenzione di farci dei soldi [nei capitoli che seguono la prima persona come soggetto delle frasi sarà sempre riferita all'autore. (N.d.T.)]. L'ha scritto perchè il tema dell'energia sostenibile è importante. Se il lettore vorrà consultare il libro, lo potrà fare liberamente all'indirizzo internet `www.withouthotair.com`.

C'è anche un secondo aspetto importante: il lettore potrà anche utilizzare liberamente *tutto* il materiale presentato in accordo alla licenza Creative Commons Attribution-Non-Commercial-Share-Alike 2.0 UK: England & Wales, *ad eccezione* delle figure e delle foto la cui proprietà intellettuale appartiene a terze parti secondo quanto esplicitamente riportato nel testo. Infatti, alcune figure e foto non possono essere liberamente riutilizzate perchè l'autore ha ottenuto da parte dei detentori dei loro diritti il permesso di utilizzarli solo in questo libro e *non*, anche, di condividerli sotto la licenza Creative Commons. In particolare, i lettori sono invitati a fare uso dei contenuti di questo libro nel corso di attività di formazione. Nel sito web dell'autore sono presenti i file contenenti le figure ad alta definizione riportate nel libro.

Come utilizzare questo libro

Alcuni capitoli iniziano con la citazione di una frase di qualcun altro. Non necessariamente le opinioni personali dell'autore coincidono con quanto riportato. Il lettore è invitato a pensare a queste citazioni come provocazioni, come ipotesi che devono essere messe alla prova in maniera critica.

Molti dei primi capitoli (numerati con 1, 2, 3, ...) sono associati ai capitoli tecnici (A, B, C, ...). La parte di descrizione tecnica inizia a pagina 282.

Alla fine di ogni capitolo sono riportate note esplicative e riferimenti alle fonti per ulteriori approfondimenti. Precisi rimandi a note a piè pagina sono state evitati, in quanto, a giudizio dell'autore, possono distrarre la lettura. In ogni caso il lettore attento riuscirà ad associare ogni affermazione nel testo con una nota posta alla fine del capitolo dove sono contenuti tutti i dettagli sulle fonti.

Gli indirizzi internet dove poter trovare ulteriori informazioni sono riportati nel testo. Nel caso in cui l'indirizzo internet sia troppo lungo, il lettore troverà un codice come, ad esempio, [`yh8xse`], che sarà utilizzato come riferimento nel libro e la cui corrispondenza all'indirizzo internet completo si trova alla fine del libro alla pagina 385. Ad esempio, `yh8xse` è il codice per l'indirizzo completo `http://tinyurl.com/yh8xse`. Una lista completa degli indirizzi Web citati in questo libro si trova anche su internet all'indirizzo `http://tinyurl.com/yh8xse`.

Commenti e correzioni sono i benvenuti. L'autore è cosciente del fatto di aver preso anche degli abbagli e nelle prime versioni del libro di essersi sbagliato nella stima di alcuni numeri per un fattore anche doppio. Mentre si augura che gli errori rimasti siano più piccoli di questa grandezza di errore, si aspetta di aggiornare i numeri presentati dal momento che il processo di conoscenza dell'energia sostenibile è un processo continuo.

Nel fare riferimento a questo libro, il lettore è invitato a utilizzare la seguente dicitura:

David J.C. MacKay. *Sustainable Energy – without the hot air*.
UIT Cambridge, 2008. ISBN 978-0-9544529-3-3. Available free online from `www.withouthotair.com`.

Indice

I Numeri, non aggettivi 1

1 Motivazioni 2
2 Il bilancio 26
3 Automobili 34
4 Eolico 37
5 Aerei 40
6 Solare 43
7 Riscaldamento e raffrescamento 56
8 Idroelettrico 61
9 Illuminazione 64
10 Eolico sul mare 67
11 Gadgets 75
12 Onde del mare 80
13 Cibo e fattorie 83
14 Maree 89
15 Roba varia 97
16 Geotermico 106
17 Servizi pubblici 111
18 Vivere grazie alle rinnovabili? 114

II Fare la differenza 125

19 Ogni GRANDE azione è di grande aiuto 126
20 Trasporti più efficienti 130
21 Riscaldamento più intelligente 155
22 Uso efficiente dell'elettricità 172
23 Combustibili fossili sostenibili? 174
24 Nucleare? 178
25 Vivere grazie alle rinnovabili di altri Paesi? 196
26 Fluttuazioni e stoccaggio 206
27 Cinque piani energetici per la Gran Bretagna 225
28 I costi nella giusta prospettiva 237
29 Cosa fare ora 246
30 Piani energetici per Europa, America e Mondo 257
31 Un'ultima cosa di cui si dovrebbe parlare 267
32 Dire di sì 278

Ringraziamenti 279

III Capitoli tecnici 281

A Automobili II 282
B Eolico II 293
C Aerei II 300
D Solare II 316
E Riscaldamento II 323
F Onde del mare II 343
G Maree II 347
H Roba varia II 360

IV Dati utili 367

I Riferimenti rapidi 368
J Popolazioni e superfici terrestri 379
K Storia dell'energia nel Regno Unito 383

Sitografia 385

Bibliografia 389

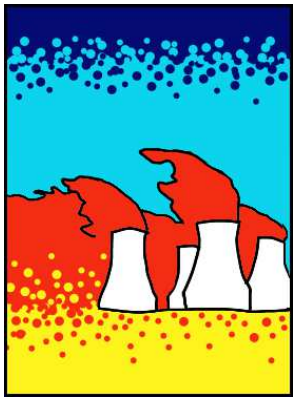
Indice analitico 396

Nota biografica dell'autore 410

Nota biografica dei traduttori 410

Parte I

Numeri, non aggettivi



1 Motivazioni

Viviamo un tempo dove le emozioni e i sentimenti contano di più della verità e c'è una grande ignoranza della scienza.

James Lovelock

Il mondo in riserva di David Goodstein (2004).

L'ambientalista scettico di Bjørn Lomborg (2001).

Nel recente passato sono stati pubblicati due libri, uno scritto da un professore di fisica, l'altro da un economista. In *Il mondo in riserva*, del fisico David Goodstein viene descritta un'imminente crisi energetica connessa con la fine dell'era del petrolio. Lo scienziato, che lavora presso l'università californiana di Caltech, predice che questa crisi arriverà presto: in particolare si farà sentire in maniera pesante non tanto quando l'ultima goccia di petrolio sarà estratta ma piuttosto quando la quantità di petrolio estratto non riuscirà a soddisfare la domanda - probabilmente tra il 2015 e il 2025. Oltretutto, anche se magicamente riuscissimo a soddisfare con l'energia nucleare tutti i nostri bisogni di energia odierni, sempre secondo Goodstein, la mancanza di petrolio sarebbe rimpiazzata con una crisi *nucleare* dopo appena venti anni, dal momento che le riserve di uranio saranno, a loro volta esaurite, per quella data.

In *L'ambientalista scettico* di Bjørn Lomborg viene presentato uno scenario decisamente differente. Si dice infatti che "Tutto va bene", che, ,anzi, "tutto sta migliorando" e che inoltre "non stiamo avviandoci a fronteggiare una significativa crisi energetica" e che "esiste un sacco di energia."

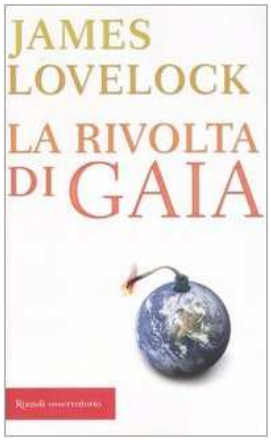
La domanda che sorge spontanea è com'è che sia possibile che due persone così preparate possano arrivare a tali opposte conclusioni. La risposta la dobbiamo cercare andando a fondo della questione.

Il tema dell'energia ha guadagnato le prime pagine dei giornali in Gran Bretagna nel 2006. Le notizie sul grande cambiamento climatico in corso e la triplicazione del prezzo del gas in appena sei anni hanno acceso un grande dibattito.

Come la Gran Bretagna dovrebbe affrontare i suoi bisogni energetici? E ancora, come il mondo intero dovrebbe affrontarli?

Una domanda, per esempio, potrebbe essere se sia meglio "l'eolico o il nucleare". È difficile non sentire, su questioni del genere, posizioni più diverse tra le persone preparate. Nel corso di un dibattito sulla proposta di aumento al ricorso dell'energia nucleare, da una parte, Michael Meacher, ex ministro dell'ambiente, ha detto che "se riusciremo a diminuire le emissioni di gas ad effetto serra del 60% ... nel 2050, non c'è nessun altra possibilità di farcela se non attraverso le energie rinnovabili"; dall'altra, Sir Bernard Ingham, ex funzionario pubblico, parlando in favore dell'aumento della produzione di energia nucleare, ha detto che "chiunque faccia affidamento sulle energie rinnovabili per soddisfare il bisogno [energetico] sta vivendo nel mondo dei sogni ed è un nemico del popolo".

All'interno stesso del mondo ecologista si possono osservare prese di posizione in contrasto tra loro. Tutti sono d'accordo nell'affermare che deve essere fatto *qualche cosa* urgentemente, ma la domanda è giustamente *che cosa.* Da una parte, Jonathan Porritt, presidente della Commissione per lo sviluppo sostenibile, [Sustainable Development Commission, in inglese, (N.d.T.)] scrive che "non c'è nessuna giustificazione oggigiorno per portare avanti dei piani per un nuovo programma nucleare e ... ogni proposta in tal senso sarebbe incompatibile con la strategia di sviluppo sostenibile [del governo]" ; e che "una strategia che non tenga conto dell'opzione nucleare potrebbe e dovrebbe essere sufficiente per raggiungere tutti gli obiettivi di riduzione delle emissione che dovremmo raggiungere per il 2050 e oltre e per assicurare un accesso a fonti di energie sicure". Dall'altra parte, su una posizione diametralmente opposta, l'ecologista James Lovelock scrive nel suo libro, *La rivolta di Gaia*, che "oggi è perfino troppo tardi per stabilire uno sviluppo sostenibile". Dal suo punto di vista, infatti, l'energia ricavata dalla fissione nucleare, se da un parte non sia raccomandabile come rimedio di lungo periodo per il nostro pianeta sofferente, è "la sola medicina efficace che possediamo". Inoltre i parchi eolici su terraferma sono, a suo parere, niente "altro che una mera iniziativa per aumentare le credenziali ambientali [dei nostri leader]".



La rivolta di Gaia: Perchè la terra si sta rivoltando - come possiamo ancora salvare l'umanità. James Lovelock (2006). © Allen Lane.

Al centro di questo infuocato dibattito ci sono i numeri. In particolare quelli che stimano per ogni fonte quanta energia può fornire, a quale costo economico e sociale e con quali rischi associati. In realtà i numeri possibili oggi con le attuali tecnologie sono raramente menzionati. Durante i dibattiti pubblici, la gente afferma semplicemente che "il nucleare è un pozzo di denaro senza fine" o che "abbiamo *abbondanza* di onde marine e di vento". Il problema con questo tipo di linguaggio è che non è sufficiente sapere che una fonte di energia sia "abbondante". Dobbiamo comparare questo dato con un altro dato altrettanto "abbondante", il nostro consumo energetico. Al fine di fare questo paragone abbiamo bisogno *di numeri, non di aggettivi.*

Quando si usano i numeri, spesso il loro significato è offuscato dalla loro grandezza. I numeri sono scelti più per impressionare e per rendere convincente la propria tesi che per informare. Si può leggere, infatti, che "gli abitanti di Los Angeles percorrono ogni giorno circa 200 milioni di Km che equivale alla distanza tra Marte e la Terra"; "Ogni anno 27 milioni di acri di foresta pluviale tropicale vengono distrutti"; "spazzatura per il valore di 14 miliardi di sterline sono gettati nel mare ogni anno"; "gli inglesi sprecano, gettandole via, 2.6 miliardi di fette di pane ogni anno"; "la quantità di rifiuti conferiti ogni anno nelle discariche inglesi potrebbe riempire 103448 pullman a due piani".

Si potrebbe affermare che se tutte le idee inutili per risolvere la crisi energetica fossero messe in fila, potrebbero arrivare fino alla luna e ritornare indietro... Ma questa osservazione ci sta portando fuori tema.

Qual'è, infatti, il risultato di questa mancanza di significato di tutti i numeri e fatti che ci vengono riportati? Che siamo inondati da un enorme massa di informazioni senza nessun senso. La BBC [la radio televisione inglese, (N.d.T.)] ci fornisce piccoli consigli su cosa dovremmo fare singolarmente per salvare il pianeta – per esempio, "staccare il caricabatteria del cellulare dalla presa di corrente quando non in uso" e se qualcuno si permette di obiettare che i caricabatterie non rappresentano *affatto* il nostro principale modo di consumo di energia, il detto "ogni piccola azione aiuta" viene subito servito come risposta. Ma in che senso ogni piccola azione aiuta? Un detto più aderente al nostro problema è che:

Se tutti noi facciamo solo piccole azioni, raggiungeremo solo un piccolo risultato.

Anche le imprese contribuiscono a questo quotidiano flusso di informazioni senza senso quando ci raccontano quanto sono brave o come possono aiutarci a "fare la nostra parte". Per esempio, nel sito internet della società BP vengono celebrate le riduzioni di emissioni di anidride carbonica (CO_2) che sperano di raggiungere cambiando il tipo di vernice usato per dipingere le petroliere della flotta della compagnia petrolifera. C'è davvero qualcuno che ci può cascare? Di certo, noi tutti indovineremo che se le emissioni di quella società devono essere significativamente ridotte, quello che conta non è la vernice esterna ma quello che è *dentro* alla nave che merita attenzione. BP ha anche creato un sito, "`targetneutral.com`", dove viene offerto un servizio di assoluzione delle emissioni di anidride carbonica e dove è possibile "neutralizzarle" senza che "costi un occhio della testa" – in realtà per la modesta cifra di 40£ all'anno tutta l'emissione di CO_2 prodotta da chi sottoscrive il servizio viene neutralizzata – . Come può essere vero tutto questo ? Se il vero costo per risolvere il problema del cambiamento climatico fosse solo 40£ per persona, allora il governo potrebbe riuscirci con pochi spiccioli in più prelevati dalle tasche dei contribuenti da parte del ministro delle finanze inglese .

In maniera ancora più truffaldina ci sono società che sfruttano le odierne preoccupazioni per l'ambiente, offrendo nel loro catalogo "batterie ricaricabili ad acqua", "telefonini biodegradabili", "aerogeneratori portatili da installare sulle braccia" ed altri inutili oggetti.

E poi pure gli attivisti ecologisti ci mettono del loro. Ad esempio, le persone che vogliono promuovere le energie rinnovabili rispetto al nucleare affermano che "i parchi eolici sul mare potrebbero fornire energia elettrica sufficiente per tutte le case inglesi", aggiungendo, di seguito, che "nuove centrali nucleari faranno ben poco per affrontare il cambiamento climatico" perchè dieci nuove centrali "ridurrebbero le emissioni solo del 4%". Questo modo di argomentare le proprie ragioni è fonte di confusione perchè il campo del confronto viene cambiato a metà strada quando si passa da "il numero di case servite" alla "riduzione delle emissioni". La verità è che il totale dell'energia fornita dai magnifici aerogeneratori che "potrebbero alimentare tutte le case inglesi" è *esattamente la stessa* che po-

trebbe essere generata da dieci centrali nucleari! Infatti "l'energia elettrica consumata da tutte le case inglesi" conta solo per il 4% delle emissioni del Regno Unito.

Ma forse i più grandi colpevoli di questo stato delle informazioni senza nessun senso sono proprio quelle persone che dovrebbero conoscere meglio come stanno le cose - per esempio l'editore New Scientist che promuove notizie come "l'automobile alimentata ad acqua".*

In un clima dove le persone non capiscono i numeri, i giornali, gli attivisti, le società e i politici possono essere complici di un crimine.

Abbiamo bisogno di numeri semplici, che siano comprensibili, comparabili e memorizzabili.

Con semplici ed onesti numeri sulla tavola, siamo in grado di rispondere alle seguenti domande:

1. Un paese come la Gran Bretagna [o l'Italia, (N.d.T.)] può ragionevolmente pensare di poter vivere sull'energia prodotta da proprie fonti rinnovabili?

2. Se ognuno di noi ponesse il termostato un grado più vicino alla temperatura esterna, guidasse automobili più piccole e staccasse dalla presa elettrica il caricabatteria quando non in uso, sarà evitata una crisi energetica ?

3. La tassa di circolazione [per le automobili] dovrebbe essere sensibilmente aumentata? Il limite di velocità sulle strade dovrebbe essere dimezzato?

4. Veramente qualcuno che difende gli aerogeneratori contro le centrali nucleari è "un nemico del popolo"?

5. Se il cambiamento climatico è "una minaccia più grande del terrorismo ", allora i governi dovrebbero penalizzare "la glorificazione dei viaggi" e approvare leggi contro gli "atti in difesa del consumo"?

6. Adottando "tecnologie avanzate", potremmo eliminare le emissioni in aria di anidride carbonica senza cambiare il nostro modo di vivere?

7. Le persone dovrebbero essere incentivate ad adottare una dieta più vegetariana?

8. La popolazione sulla terra è sei volte troppo grande?

*Si rimanda il lettore alle note presenti al fondo del capitolo (pagina 22) per tutti i dettagli. (Ogni capitolo presenta alla fine delle note con riferimenti, fonti e dettagli delle affermazioni. A parte questa, nel testo non ci saranno riferimenti a note a piè pagina al fine di evitare di distrarre il lettore).

Figura 1.1. Questo opuscolo di Greenpeace è arrivato nella buca delle lettere dell'Autore nel maggio 2006. Per davvero gli amati aerogeneratori hanno la capacità di rimpiazzare le odiate torri di raffreddamento?

Perchè stiamo discutendo di politica energetica?

Il dibattito sull'energia è oggi dettato da tre differenti preoccupazioni.

La prima è che i combustibili fossili sono una risorsa finita. È plausibile che il petrolio (con il quale viaggiano le nostre automobili e camion) e il gas (con il quale scaldiamo molte delle nostre case), entrambi a basso prezzo, finiranno in un periodo di tempo che ci vedrà diretti testimoni di questo evento. Per questo cerchiamo fonti di energia alternative. Anzi, dal momento che i combustibili fossili sono una preziosa materia utilizzata per produrre la plastica e ogni altro tipo di oggetti utili, sarebbe meglio, forse, se li utilizzassimo per scopi migliori rispetto a bruciarli solamente.

La seconda preoccupazione è che siamo interessati alla messa in sicurezza degli approvvigionamenti energetici. Anche se i combustibili fossili sono ancora disponibili in qualche altra parte del mondo, forse è il caso di non fare dipendere la nostra economia dai capricci di paesi stranieri inaffidabili. (L'autore spera che tutta l'ironia contenuta in quest'ultima affermazione possa essere colta). Guardando la figura 1.2, si può certamente affermare che le "nostre" riserve di carburanti fossili del mare del Nord hanno già superato il punto di massima produzione. Il Regno Unito ha, inoltre, un problema di importanza sempre più crescente che è quello della messa in sicurezza degli approvvigionamenti energetici, oltre modo chiamato "gap di energia". Infatti, un consistente numero di vecchie centrali a carbone e centrali nucleari chiuderanno nella prossima decade (figura 1.3), ed in questo modo c'è il rischio che la domanda di elettricità ad un certo punto sarà maggiore della capacità di produzione, se non sono messi in campo dei piani adeguati.

La terza preoccupazione è che molto probabilmente l'uso di combustibili fossili ha impatti sul clima. Il cambiamento climatico è riconducibile a diverse attività di origine umana di cui la più importante per ordine di maggiore impatto è l'aumento dell'effetto serra dovuto alla produzione di anidride carbonica (CO_2). La maggior parte delle emissioni di anidride carbonica sono legate alla combustione di carburanti fossili. E questo fatto avviene principalmente perchè abbiamo bisogno di produrre energia. Così, per risolvere il problema del cambiamento climatico, abbiamo bisogno di trovare un nuovo modo di produrla. Il cambiamento climatico è soprattutto un problema energetico.

Quale che sia di queste tre preoccupazioni quella che ci motiva di più, abbiamo bisogno di numeri e di definire delle politiche che possano avere un reale impatto.

Le prime due motivazioni per ridurre drasticamente l'uso di combustibili fossili sono di natura egoistica. La terza che riguarda il cambiamento climatico è più una motivazione di natura altruistica – il fardello delle conseguenze del cambiamento climatico sarà sopportato dalle future generazioni lungo centinaia di anni a venire. Alcune persone pensano che il cambiamento climatico non è di loro resposabilità. Si sentono, infatti,

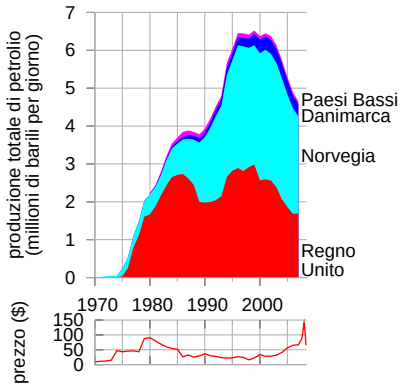


Figura 1.2. Le "nostre" riserve di combustibile fossile si stanno esaurendo? Produzione di greggio totale del mare del Nord, e prezzo del petrolio in dollari per barile al 2006.

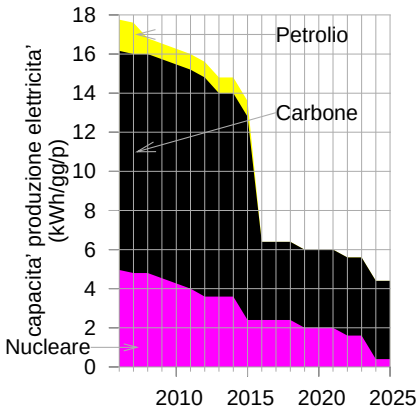


Figura 1.3. Il gap di energia creato dalla chiusura nel Regno Unito delle centrali elettriche, così come previsto dal piano della società elettrica EdF. Questo grafico mostra una stima nel tempo delle capacità produttive delle centrali a carbone, nucleari e a petrolio, espresse in chilowatt-ora al giorno per persona (kWh/gg/p). La capacità è la massima potenza di produzione per ogni tipo di centrale.

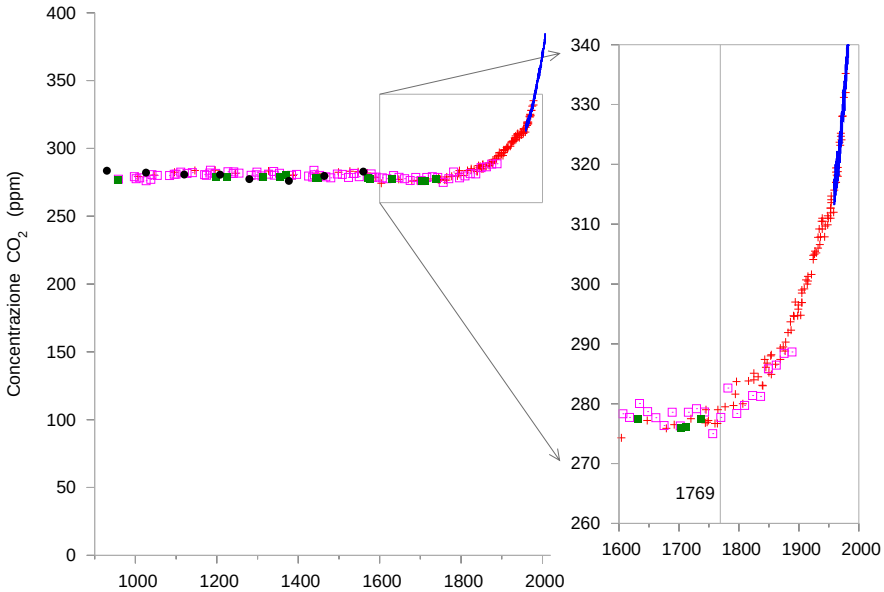


Figura 1.4. Concentrazione (in parti per milione) di anidride carbonica (CO_2) degli ultimi 1100 anni, misurata attraverso l'analisi di campioni di ghiaccio estratti attraverso carotaggi (fino al 1977) e direttamente nelle Hawaii (dal 1958 in avanti).

A giudizio dell'autore qualche cosa di nuovo deve essere successo tra il milleottocento e il duemila. Il 1769 è l'anno in cui James Watt brevettò la sua macchina a vapore. (La prima macchina a vapore fu inventata 70 anni prima, nel 1698, ma quella di Watt era molto più efficiente).

affermazioni del tipo "Come il mio agire può avere un impatto quando la Cina è fuori controllo?". Per questo motivo, tratteremo il tema del cambiamento climatico in dettaglio in questo capitolo. L'autore nella stesura di questo libro ha appreso fatti interessanti che gettano luce su queste questioni etiche. Se il lettore non avesse interesse al tema del cambiamento climatico può saltare direttamente al prossimo capitolo a pagina 19.

Il cambiamento climatico

Le ragioni del cambiamento climatico sono trattate sviluppando tre argomenti in successione logica. Primo: la concentrazione di anidride carbonica cresce perchè le attività umane bruciano combustibili fossili. Secondo: l'anidride carbonica è un gas ad effetto serra. Terzo: l'aumento dell'effetto serra provoca l'aumento della temperatura globale terrestre (così come altri effetti collaterali).

In primis, osserviamo che le concentrazioni di anidride carbonica stanno aumentando. Nella Figura 1.4 vengono riportate le misure sulla concentrazione di CO_2 nell'aria a partire dall'anno 1000 d.C. fino ad oggi. Alcuni osservatori "scettici" hanno affermato che è un fenomeno naturale il recente aumento di concentrazione di CO_2. Ma che cosa significa "essere scettico"? Forse essere una "persona che non ha neppure gettato una piccola occhiata ai dati"? Non appare plausibile, giusto come ipotesi di lavoro, che *qualche cosa* possa essere successa tra il il milleottocento e il duemila? Qualche cosa che non faceva parte del processo naturale presente nelle precedenti migliaia di anni?

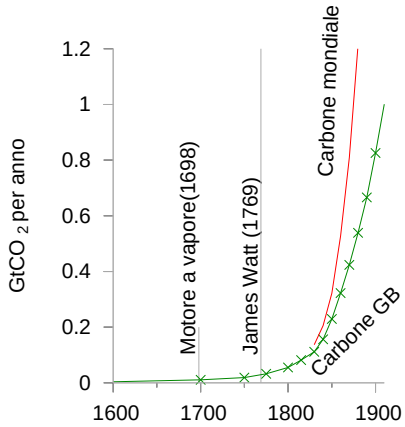
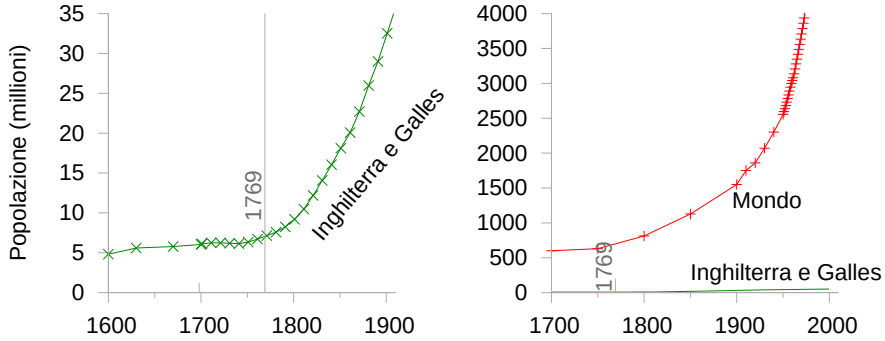


Figura 1.5. Serie storica della produzione di carbone inglese e carbone mondiale dal 1600 al 1910. Il volume di produzione è espresso in miliardi di tonnellate di CO_2 – questa unità di misura incomprensibile, sarà resa comprensibile personalizzandola nel proseguo del capitolo.

Qualche cosa è successo, eccome, ed è stata chiamata Rivoluzione Industriale. Nel grafico viene evidenziato l'anno 1769, in cui James Watt brevettò la sua macchina a vapore. Se infatti la prima macchina a vapore fu inventata nel 1698, quella di Watt, molto più efficiente, diede un impulso alla rivoluzione industriale. Una della maggiori applicazioni della macchina a vapore era quella di pompare via l'acqua dalle miniere di carbone. La Figura 1.5 mostra cosa successe alla produzione di carbone inglese dal 1769 in avanti. La figura mostra la produzione di carbone espressa in miliardi di tonnellate di CO_2 rilasciate nell'aria quando veniva bruciato. Infatti, nel 1800 il carbone era usato nel processo di produzione del ferro, per costruire navi, per riscaldare le case, per fornire energia alle locomotive ed altri macchinari tra cui naturalmente c'erano le pompe per estrarre l'acqua delle miniere in maniera da estrarre quantità sempre maggiori del carbone presente sotto le colline inglesi e gallesi. La Gran Bretagna era magnificamente dotata di carbone: quando la rivoluzione industriale iniziò, la quantità di anidride carbonica contenuta nel carbone del sottosuolo era più o meno equivalente a quella del petrolio del sottosuolo dell'Arabia Saudita.

Nel giro di trenta anni, tra il 1769 e il 1800, la produzione di carbone inglese raddoppiò. Dopo altri trenta anni, era ancora raddoppiata. Un altro raddoppio si raggiunse nei seguenti *venti* anni (nel 1850), e ancora nel 1870. Tutto questo carbone permise alla Gran Bretagna di colorare il globo di rosa [l'autore si riferisce al fatto i territori dell'impero inglese nelle mappe del mondo venivano evidenziati con il colore rosa, (N.d.T.)]. La prosperità che godettero in quel secolo l'Inghilterra e il Galles si riflesse in un aumento della popolazione che non si era mai visto:



Alla fine anche altri paesi iniziarono a partecipare alle emissioni mano a mano che la rivoluzione industriale prese piede anche lì. La figura 1.6 mostra la serie storica della produzione inglese e mondiale di carbone espressa nella stessa scala di figura 1.5, ma senza riportare cosa successe nei 50 anni successivi. Mentre la produzione inglese di carbone ebbe il suo picco nel 1910, quella mondiale continuò a raddoppiare ogni 20 anni. È difficile mostrare in un unico grafico la serie storica della produzione di carbone.

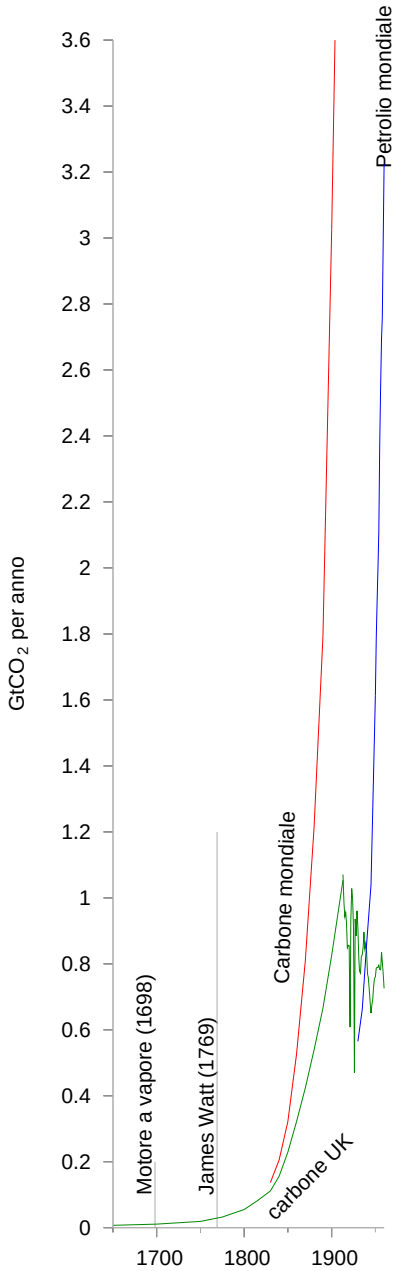
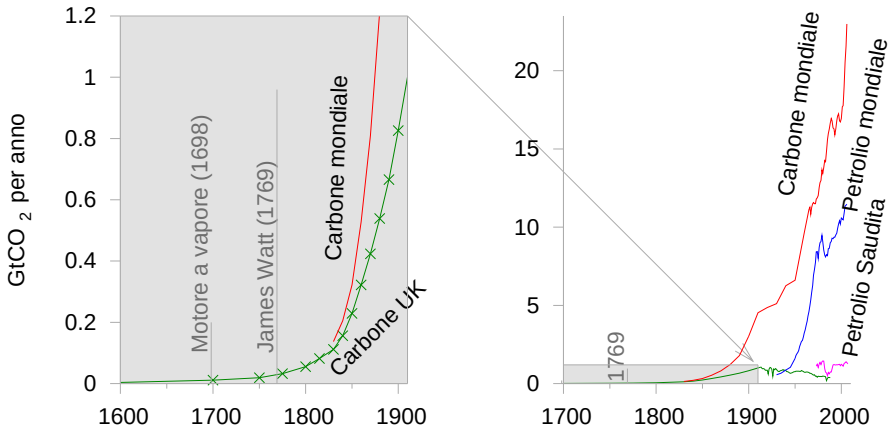


Figura 1.6. Cosa successe dopo.
Serie storica della produzione di carbone inglese e carbone mondiale tra il 1650 e il 1960, nella stessa scala di figura 1.5.

Infatti, per raffigurare cosa successe nella stessa scala nei cinquanta anni *dopo* il picco inglese, ci sarebbe bisogno di una pagina del libro alta un metro! Al fine di superare questa difficoltà possiamo comprimere la scala dell'asse verticale sia in maniera lineare



sia in una maniera non uniforme tale che piccoli e grandi numeri possono essere osservati contemporaneamente su un unico grafico. Un utile modo per farlo è quello di utilizzare una scala logaritmica. Questo è esattamente quello che è stato fatto nei due grafici riportati in in figura 1.7 (p10). Su una scala logaritmica, ogni volta che la quantità rappresentata moltiplica per dieci il suo valore (da 1 a 10, da 10 a 100, da 100 a 1000) questo fatto è rappresentato da distanze uguali. Su una scala logaritmica, una quantità che cresce ogni anno di una percentuale costante (chiamata "crescita esponenziale") è graficamente raffigurata da una linea retta. I grafici logaritmici sono un utilissimo strumento quando si deve studiare la crescita di una variabile. Mentre i grafici con scale ordinarie raffigurati nelle figure delle pagine 7 e 8 ci mostrano che la produzione inglese e mondiale di carbone aumentò in maniera sostenuta, la crescita relativa non appare evidente con queste raffigurazioni. I grafici logaritmici ci permettono di comparare i tassi di crescita. Osservando l'inclinazione della curva della popolazione, per esempio, possiamo osservare che il tasso di crescita della popolazione mondiale negli ultimi cinquanta anni è stato leggermente superiore a quello dell'Inghilterra e Galles nel corso dell'ottocento.

Dal 1769 al 2006, la produzione mondiale annuale di carbone è cresciuta di 800 volte. E ancora oggi è in aumento. Anche altri carburanti fossili sono stati estratti – il grafico in mezzo di figura 1.7 mostra, per esempio, la produzione di petrolio – ma, in ogni caso, in termini di emissioni di CO_2, il carbone detiene il primato.

Il consumo di combustibili fossili è la principale ragione del fatto che la concentrazione di CO_2 sia aumentata. Questo è un fatto anche se si sente un continuo vociare di fondo da parte di un gruppo di scettici del cambiamento climatico. Il loro argomentare è ben espresso da quello che il

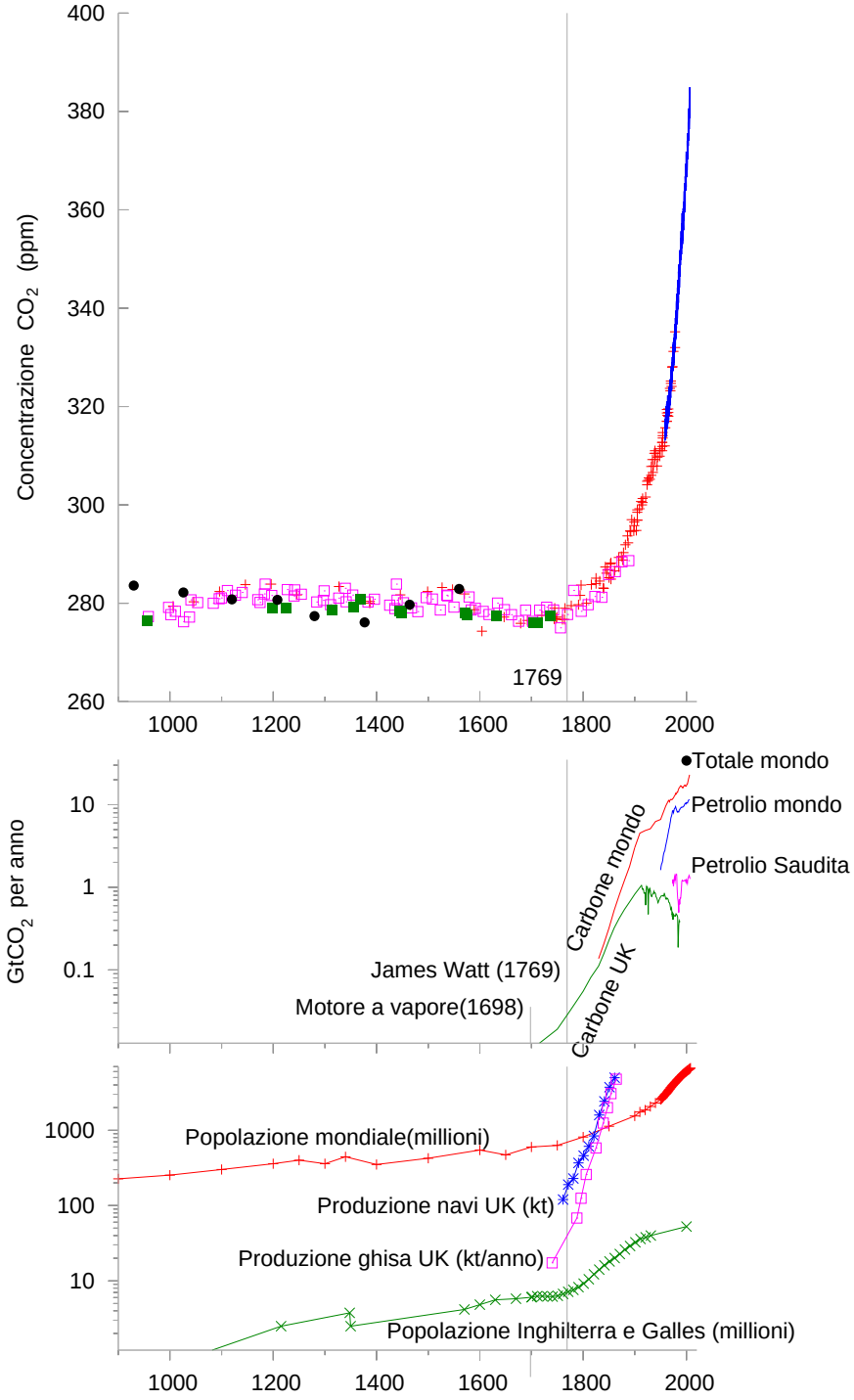


Figura 1.7. Il grafico in alto mostra le concentrazioni (in ppm, parti per milione) di anidride carbonica (CO_2) negli ultimi 1100 anni – i dati sono gli stessi presentati in figura 1.4.

Immagine di James Watt e della sua macchina a vapore del 1769.

Il grafico in posizione centrale riporta (su una scala logaritmica) la serie storica della produzione di carbone inglese, petrolio saudita, carbone mondiale e petrolio mondiale. Viene riportato (punto nero in alto a destra) anche il dato delle emissioni totali di gas serra nell'anno 2000. Tutte le produzioni sono espresse nell'unità di misura di emissioni equivalenti di CO_2.

Il grafico in basso mostra (su una scala logaritmica) alcune conseguenze della rivoluzione industriale: il rapido aumento della popolazione in Inghilterra e, più tardi, nel resto del mondo; la crescita impressionante della sua produzione di ghisa grezza (espressa in migliaia di tonnellate per anno, kt) e la crescita del tonnellaggio delle sue navi (espresso in migliaia di tonnellate, kt).

Rispetto ai grafici delle pagine precedenti, la scala logaritmica ci permette di mostrare su un unico grafico la popolazione inglese e mondiale riuscendo a osservare delle interessanti dinamiche presenti in entrambe.

commentatore Dominic Lawson, del giornale *Independent* ha scritto e che viene riportato qui sotto:

> "La combustione dei combustibili fossili rilascia nell'atmosfera circa 7 gigatons di CO_2 all'anno che suona essere un grande numero. Ma la biosfera e gli oceani ne rilasciano circa 1900 gigatons and 36 000 gigatons rispettivamente – ... una ragione per cui alcuni di noi sono scettici sull'enfasi con cui viene presentato il ruolo delle attività umane sulla produzione di gas ad effetto serra. Ridurre le emissioni umane di CO_2 è megalomania perchè si sta esagerando l'importanza dell'uomo. I politici non possono modificare il tempo meteorologico".

Ci sono delle buone ragioni per avere una dose di scetticismo, e non tutto quello che gli scettici affermano è spazzatura – ma il giornalismo irresponsabile di Dominic Lawson merita di essere riposto nel cassonetto dei rifiuti.

Il primo problema con il ragionamento di Lawson è che *tutti e tre i numeri* che menziona, ovvero, (7, 1900, e 36 000) sono *sbagliati!*. Quelli corretti sono 26, 440, e 330. Lasciando da parte questi errori, focalizziamoci sul principale argomento, cioè la relativa piccolezza delle emissioni di origine umana.

Certo, i flussi naturali di CO_2 *sono* più grandi di quelli che duecento anni fa l'uomo ha iniziato, in maniera significativa, a emettere in più bruciando combustibili fossili. Ma è un enorme errore quantificare solo i flussi naturali *emessi* nell'atmosfera, scordandosi di menzionare che altrettanto grandi flussi dalla atmosfera sono *assorbiti* dalla biosfera e dagli oceani. Il punto è che questi due flussi *naturali* sono stati in quasi perfetto equilibrio per millenni. Quindi non è affatto rilevante il fatto che questi flussi siano più grandi di quelli di origine umana. I flussi naturali *si cancellano mutualmente*. In questa maniera i flussi naturali, pur grandi che essi siano, hanno lasciato *costante* la concentrazione di CO_2 nell'atmosfera e negli oceani nel corso delle ultime migliaia di anni. D'altra parte, il fatto di bruciare combustibili fossili, crea un *nuovo* flusso di anidride carbonica che, seppur piccolo, *non viene cancellato*. Per analogia si può pensare a quello che succede all'area controlli passaporti di un aeroporto, dove arrivano regolarmente un migliaio di passeggeri all'ora e ci sono sufficienti addetti ai controlli per esaminare esattamente mille passeggeri all'ora. In genere ci potrà essere un piccola coda, ma questa non sarà mai troppo lunga grazie al fatto che si è dimensionato il servizio in maniera tale da servire tutti i passeggeri in arrivo. Immaginiamo ora che a causa della nebbia alcuni aerei diretti in un altro aeroporto più piccolo siano dirottati nel nostro. Supponiamo, altresì, che questo inconveniente aggiunga cinquanta passeggeri all'ora da dover controllare – tutto sommato un numero piccolo comparato a quello di prima. Se inizialmente almeno, le autorità preposte, non aumentassero il numero di addetti ai controlli e questi continuassero

solo a controllarne mille all'ora, quello che avverà, sarà che piano piano ma in maniera certa e sicura la *coda crescerà*. Bruciare combustibili fossili significa senza dubbio aumentare la concentrazione di CO_2 nell'atmosfera e sulla superficie degli oceani. Nessuno scienziato del clima mette in dubbio questo fatto. L'intervento dell'uomo per quanto riguarda la concentrazione di CO_2 *è* significativo.

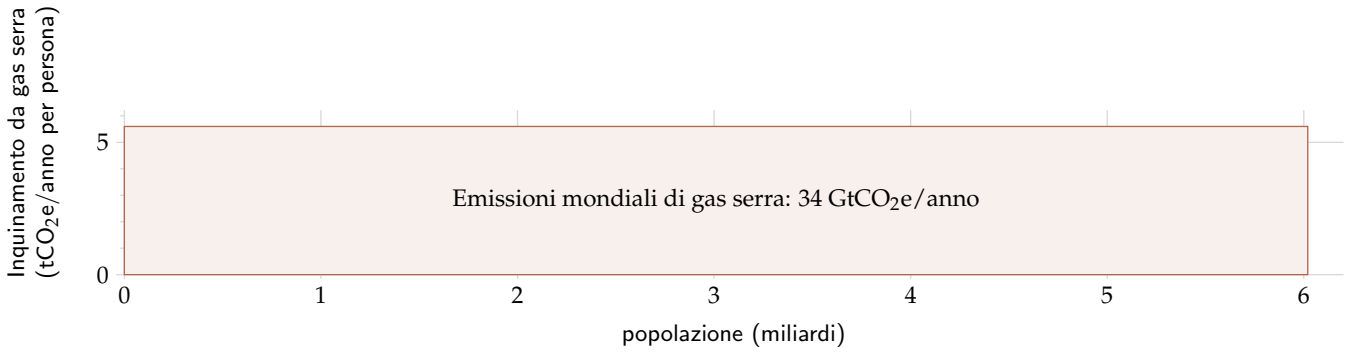
Bene. Ora che abbiamo dimostrato che la combustione di combustibili fossili aumenta considerevolmente la concentrazione di CO_2 ci dobbiamo chiedere perchè sia importante. Dopo tutto "l'anidride carbonica" è un gas naturale" e i produttori di petrolio ci ricordano che "l'anidride carbonica è vita". Se infatti il CO_2 non avesse effetti nocivi, allora le sue emissioni non sarebbero un problema. Purtroppo, l'anidride carbonica è un gas ad effetto serra. Sicuramente non il più potente, ciò nonostante di una certa importanza. Se ne rilasciamo ancora nell'atmosfera farà quello che ogni gas ad effetto serra produce, ovvero, assorbe la radiazione dei raggi infrarossi (calore) emessa dalla terra e la riflette verso una direzione casuale; il risultato di questa operazione di ritrasmissione casuale del calore a livello di atmosfera è quello di trattenere il flusso di calore proveniente dalla Terra, proprio come un grande piumone. In questo modo l'anidride carbonica ha un effetto riscaldante. Questo fatto è basato non su complesse serie storiche delle temperature globali ma sulle semplici proprietà della molecola di CO_2. I gas ad effetto serra sono un piumone e il CO_2 ne è uno strato.

Allora la domanda è che cosa succederà se l'umanità riuscirà a raddoppiare o triplicare la concentrazione di CO_2(fatto che certamente avverrà se continuiamo a comportarci come se niente stesse accadendo). La scienza che studia il clima è difficile. Il clima è una bestia strana e complessa e quale risultato sarà prodotto dal raddoppio della concentrazione di CO_2 è difficile da prevedere. Esiste un consenso tra i migliori modelli climatologici e sembra affermare che se la concentrazione di CO_2 raddoppiasse, questo sarebbe equivalente ad un aumento dell'intensità del sole di circa il 2% e si arriverebbe, così, ad un incrememento della temperatura media globale di circa 3 °C. Questo sarebbe quello che gli storici chiamano una Brutta Cosa. Non si riportano in questo libro tutte le litanie sugli effetti drastici a cui stiamo andando incontro dal momento che dovrebbero essere state sentite da altre parti. In genere iniziano con "la calotta artica si scioglierà piano piano e in meno di 100 anni il livello dei mari crescerà di circa 7 metri".. La violenza di questi scenari ricade sulle future generazioni. Tali temperature non si sono mai viste sulla terra per lo meno negli ultimi 100 000 anni ed è possibile che l'ecosistema subirà una significativa alterazione tale che la terra potrebbe smettere di fornire quei beni e servizi che oggi diamo per scontato che ci siano.

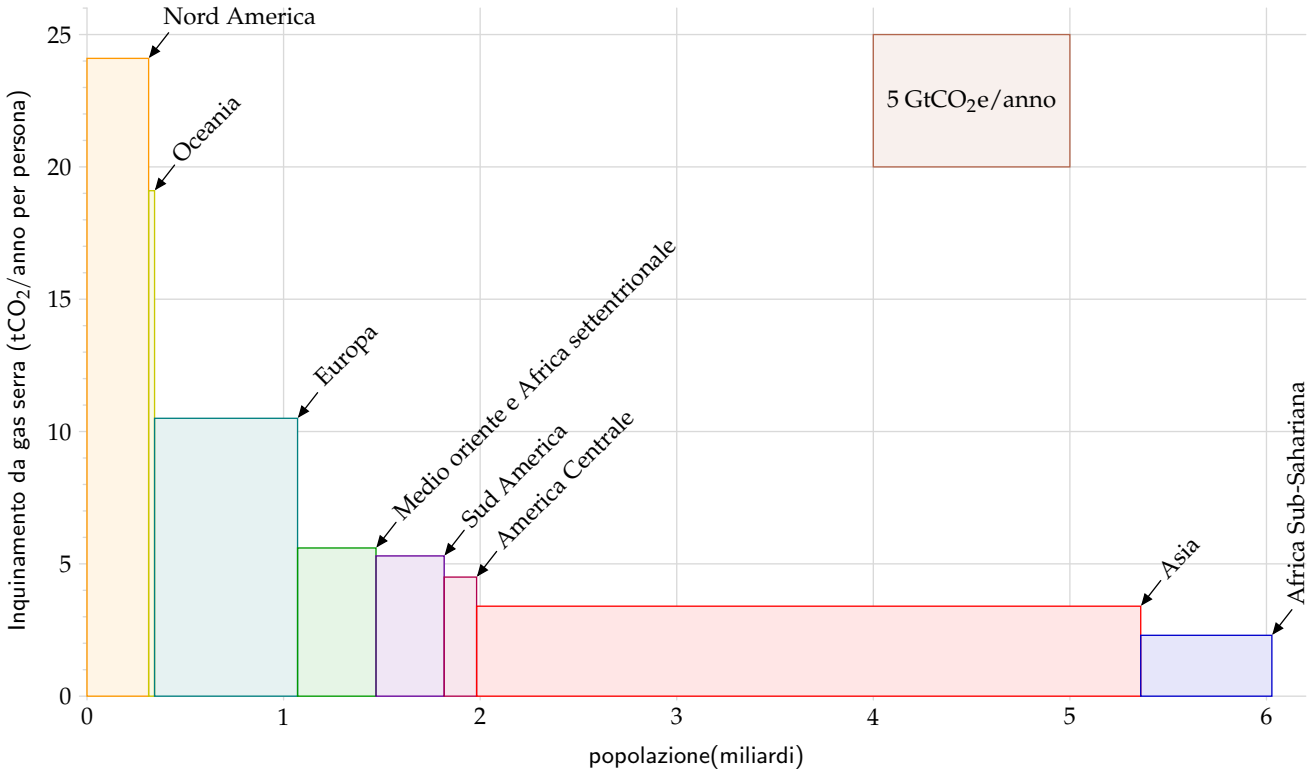
La scienza del clima e i modelli associati sono difficili e presentano molte incertezze. Ma l'incertezza su quanto sarà precisamente la risposta del clima ad un aumento supplementare dei gas ad effetto serra, non giustifica non fare niente. E come se guidando una motocicletta potente nella nebbia vicino ad uno strapiombo sul mare giustificassimo il fatto il *non* rallentare perchè non abbiamo una mappa dettagliata dei luoghi.

Chi, quindi, dovrebbe rallentare la motocicletta? Chi dovrebbe farla finita con le emissioni di anidride carbonica? Chi è responsabile del cambiamento climatico? Queste sono domande chiaramente etiche, non scientifiche. Ciononostante anche le discussioni su temi etici devono essere fondate su fatti. Andiamo, ora, ad esplorare i fatti che riguardano le emissioni di anidride carbonica. Iniziamo concentrandoci sulle unità di misura con le quali sono misurate. L'anidride carbonica, il metano e l'ossido di azoto fanno parte del gruppo dei gas ad effetto serra; ognuno di questi ha differenti proprietà fisiche; per convenzione le emissioni di gas si esprimono in "quantità equivalenti di anidride carbonica", dove la parola "equivalenti" significa "che possiede lo stesso effetto riscaldante lungo un periodo di 100 anni". Una tonnellata di anidride carbonica equivalente può essere indicata in maniera abbreviata come "1 t CO_2e," e un miliardo di tonnellate (ovvero mille milioni di tonnellate) come "1 Gt CO_2e" (una giga tonnellata). In questo libro 1 t significa una tonnellata espressa nel sistema metrico (1000 kg). Non ci sarà distinzione con la tonnellata imperiale, perchè la differenza è meno del 10% rispetto alla tonnellata del sistema metrico [l'autore si riferisce al sistema di misura inglese, (N.d.T)].

Nell'anno duemila le emissioni mondiali di gas ad effetto serra sono state stimate essere circa 34 miliardi di tonnellate di CO_2-equivalente. Questo è un numero incomprensibile che possiamo rendere più facilmente intelligibile se riportato ad una dimensione personale dividendolo per la popolazione della terra, cioè circa 6 miliardi di persone, così da poter affermare che l'emissione di gas ad effetto serra *per persona* è circa $5^1/_2$ t CO_2e all'anno per persona. Possiamo, allora, rappresentare graficamente le emissioni a livello mondiale con un rettangolo la cui larghezza è la popolazione mondiale (6 miliardi) e la cui altezza è l'emissione pro-capite.



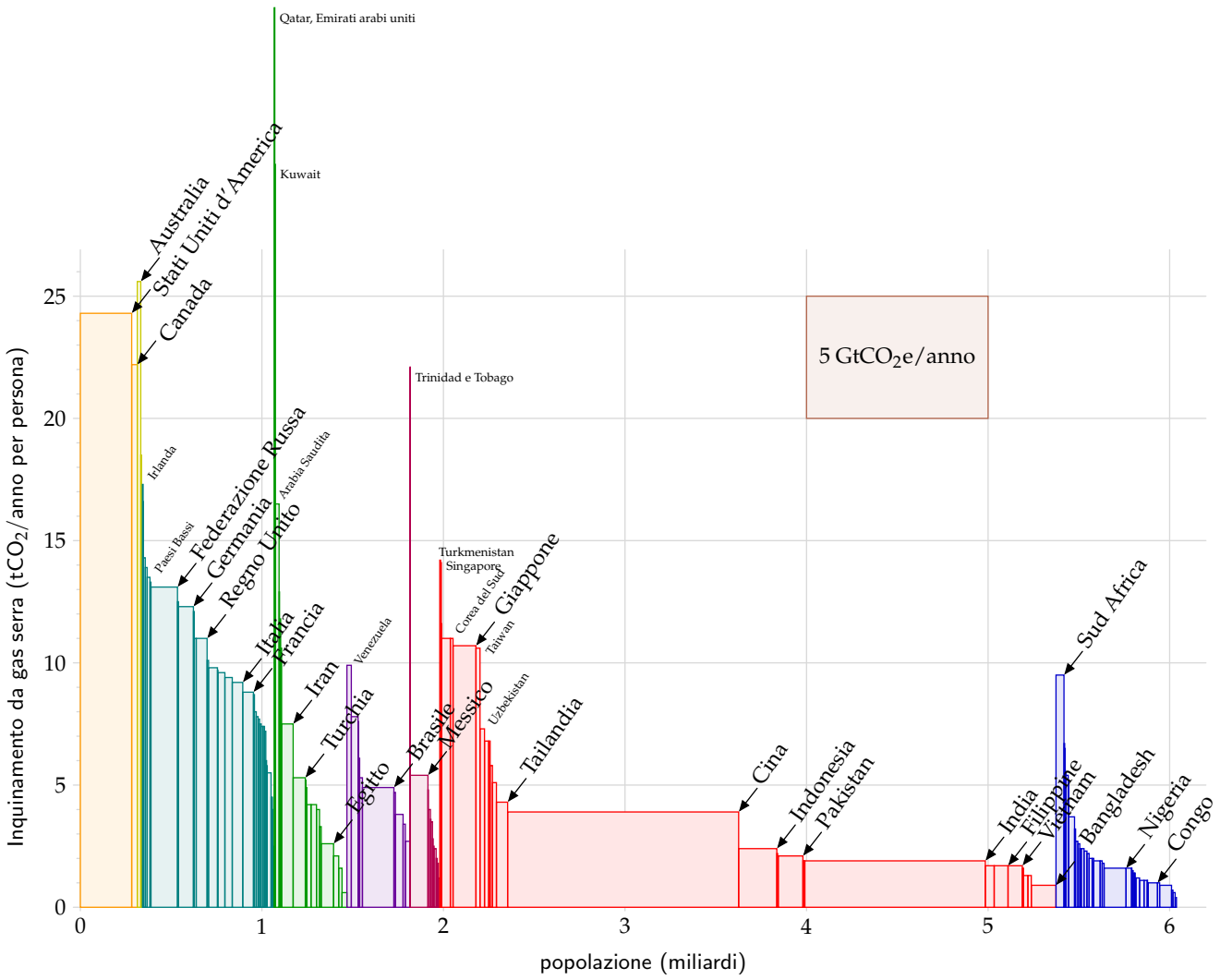
Sebbene tutte le persone sia create uguali, non tutti noi rilasciamo $5^1/_2$ t di CO_2 all'anno. Possiamo, quindi, suddividere le emissioni dell'anno duemila rappresentate dall'area del rettangolo di 34 miliardi di t tra le varie regioni del mondo:



Questo grafico, che è nella stessa scala del precedente, suddivide il mondo in otto regioni. Ogni area del rettangolo rappresenta la quantità di gas ad effetto serra emessa da quella regione. Sulla larghezza del rettangolo viene riportata la popolazione e sull'altezza l'emissione media pro-capite.

Nel corso dell'anno duemila, le emissioni di gas ad effetto serra pro-capite in Europa sono state il doppio della media mondiale; quelle in America quattro volte tanto.

Possiamo continuare l'analisi passando dalle regioni ai singoli paesi. A questo punto i risultati dello studio si fanno molto interessanti:



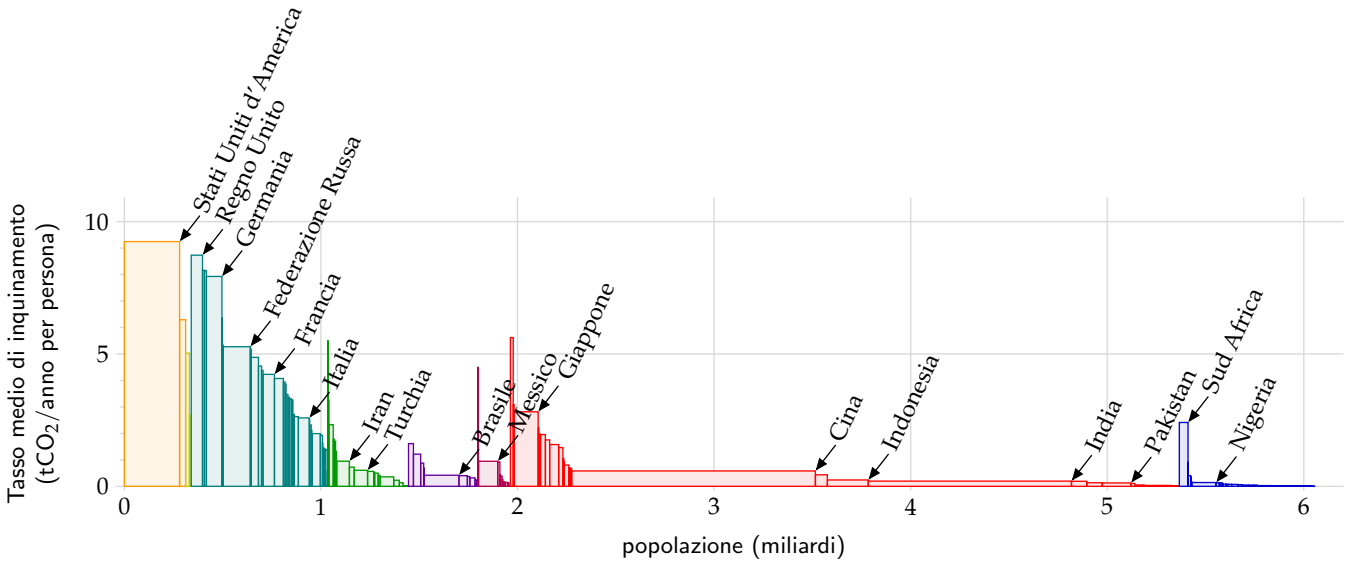
Australia, gli USA e il Canada sono i grandi paesi con le emissioni procapite più elevate. I paesi europei, il Giappone e il Sud Africa si distinguono come inseguitori. Tra i paesi europei, il Regno Unito è decisamente nella media. Che cosa possiamo dire su quel paese indisciplinato e "fuori controllo" che è la Cina? Certamente l'area del rettangolo di quel paese è comparabile con quella degli Stati Uniti, ma il fatto è che le emissioni procapite sono *sotto* la media mondiale. E quelle dell'India sono meno della *metà*. Inoltre, è utile ricordare che molte delle emissioni legate all'industria cinese e indiana sono associate alla fabbricazione di *roba varia per i paesi ricchi*.

Quindi, partendo dalla premessa che "qualche cosa si deve fare" per ridurre le emissioni di gas ad effetto serra, ci dobbiamo chiedere chi abbia la resposabilità speciale per farlo. Come è già stato scritto, questa è una

questione etica. Certo è difficile pensare ad un sistema etico che possa negare che la resposabilità debba ricadere specialmente su quei paesi a sinistra del grafico – quelli che presentano emissioni che sono due, tre o quattro volte più grandi della media mondiale. Quelli che sono più in grado di affrontare la spesa come ad esempio la Gran Bretagna e gli Stati Uniti.

Responsabilità storica per gli impatti sul clima

Se accettiamo l'idea che il clima è stato danneggiato dalle attività dell'uomo e che abbiamo bisogno che qualcuno ponga rimedio a questo problema, la domanda da porsi è chi dovrebbe pagare per questo. Certe persone affermano che "chi inquina dovrebbe pagare". I grafici riportati in precedenza mostrano chi sta inquinando oggigiorno. Tuttavia quello che più conta non è il *tasso* di emissione di CO_2 ma piuttosto la sua somma *totale* cumulata negli anni; molta (circa un terzo) dell'anidride carbonica emessa rimane nell'atmosfera per almeno 50 o 100 anni. Se accettiamo l'idea che "chi inquina dovrebbe pagare" allora dovremmo chiederci quanto ogni paese abbia contribuito in termini di emissioni di CO_2 cumulate negli anni. La prossima figura mostra proprio questo dato per ogni paese nel periodo 1880–2004.



Congratulazioni alla Gran Bretagna! Ha conquistato il podio. Oggigiorno è solamente un paese europeo che sta nella media, ma storicamente le sue emissioni per persona sono seconde solo agli Stati Uniti.

Va bene, per il momento abbiamo parlato a sufficienza di etica. Concentriamoci ora su quali sono quelle azioni che gli scienziati riconoscono essere necessarie per evitare il rischio che la temperatura della terra aumenti di 2 °C (questo è il limite sopra il quale un sacco di brutte conseguenze sono

previste). Il consenso è netto. Dobbiamo smettere con la nostra dipendenza dall'uso dei combustibili fossili e dobbiamo farlo in fretta. Alcuni paesi, tra cui la Gran Bretagna, si sono impegnati a ridurre per lo meno del 60% le loro emissioni di gas ad effetto serra per il 2050, ma dobbiamo sottolineare che questo obiettivo, per quanto radicale, molto probabilmente non permetterà di togliere le castagne dal fuoco. Se le emissioni mondiali fossero ridotte del 60% al 2050, i climatologi prevedono con un'alta probabilità, infatti, che la temperatura media globale salirà di più di 2 °C. Il livello dei tagli a cui dovremmo puntare sono mostrati in figura 1.8. Lì sono riportati due scenari di emissioni probabilmente sicuri presentati in un rapporto edito dall'Istituto per la Politica della Ricerca Pubblica [Institute for Public Policy Research] in Baer and Mastrandrea (2006). Nella curva inferiore si suppone che il declino delle emissioni cominci nel 2007, con un tasso di diminuzione di quelle globali di circa il 5% per anno. La curva superiore ipotizza un lieve ritardo nell'inizio della riduzione a un tasso di diminuzione del 4%. Entrambi i casi presentano una minima probabilità di evitare un aumento delle temperature superiore di 2 °C rispetto all'era pre-industriale. Nello scenario inferiore, la probabilità che l'aumento della temperatura *superi* i 2 °C è stimata tra il 9–26%. Nello scenario superiore, invece, è valutata tra 16–43%. Questi profili di messa in sicurezza delle emissioni, in ogni caso, richiedono delle riduzioni significativamente più decise di quelle proposte fino ad ora dal Gruppo Intergovernamentale sul Cambiamento Climatico -IPCC- [Intergovernmental Panel on Climate Change, in inglese, (N.d.T.)] o nel "rapporto Stern" del 2007.

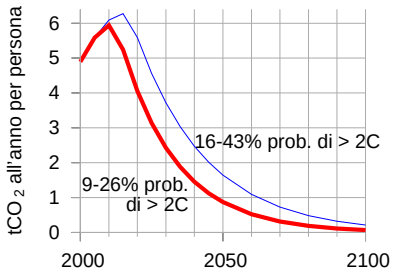
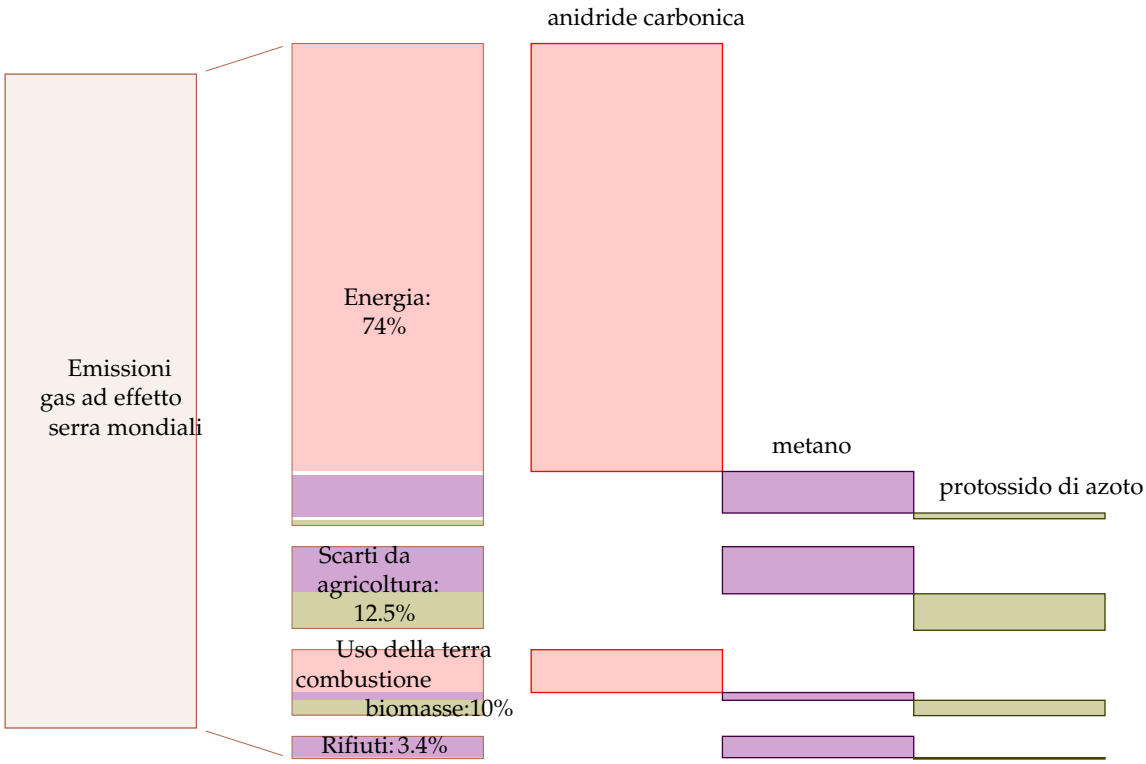


Figura 1.8. Stime delle emissioni globali nel caso di due scenari studiati da Baer e Mastrandrea, in t di CO_2 all'anno per persona, considerando una popolazione mondiale di 6 miliardi di persone. In entrambi i casi le probabilità per evitare un aumento della temperatura di 2 °C superiore al livello pre-rivoluzione industriale sono modeste.

Infatti, questi scenari richiedono un taglio alle emissioni globali del 70% o perfino del 85% al 2050. In concreto che cosa significa questo per un paese come la Gran Bretagna? Se aderissimo all'idea di "contrazione e convergenza", cioè che tutti i paesi puntino ad avere alla fine dei tassi di emissione pro-capita uguali, allora la Gran Bretagna dovrebbe indirizzarsi verso tagli maggiori del 85%: si dovrebbe, infatti, passare dalle attuali emissioni di 11 t di CO_2e all'anno anno per persona a circa 1 t , sempre all'anno per persona, nel 2050. Questa riduzione così drastica suggerisce che il miglior modo per ottenerla sia quella di non utilizzare *mai più combustibili fossili*.

Rimane un'ultima osservazione da fare sulla motivazione del cambiamento climatico: mentre un gran numero di attività legate all'uomo causano l'emissione di gas ad effetto serra, la più importante è **l'uso dell'energia**. Certe persone giustificano il fatto di non fare niente riguardo al loro utilizzo dell'energia accampando scuse del tipo "il metano prodotto dalle flautolenze delle mucche ha un effetto riscaldante più grande degli aeroplani". Certo, l'impatto delle attività agresti ha contribuito per un ottavo alle emissioni totali di gas ad effetto serra nell'anno duemila. Ma l'uso dell'energia ne ha contribuito per i tre quarti (figura 1.9). Il problema del cambiamento climatico è essenzialmente legato a quello dell'energia.

Figura 1.9. Suddivisione delle emissioni mondiali di gas ad effetto serra (2000) per origine e tipo. "Energia" si riferisce a centrali elettriche, processi industriali, trasporti, raffinamento di idrocarburi e energia usata negli edifici. "Uso della terra e combustione biomasse" si riferisce alle emissioni legate al cambio di destinazione d'uso del suolo, alla deforestazione e alla combustione di biomasse non nuove come la torba. "Rifiuti" si riferisce ai processi di smaltimento e trattamento dei rifiuti. La dimensione dei rettangoli indica il potenziale effetto riscaldante globale su un arco di tempo di 100 anni per ogni fonte. Fonte: Emission Database for Global Atmospheric Research.



Avvertenze per il lettore

Va bene, abbiamo presentato a sufficienza i dati sul cambiamento climatico. Ora, possiamo pensare che tutti noi siamo motivati per smettere di usare i combustibili fossili. Quale che ne sia la ragione, l'obiettivo di questo libro è di aiutare il lettore, da una parte, a trovare i numeri e a farci dei calcoli in maniera tale da avere gli elementi per valutare le politiche [energetiche], e, dall'altra, di vedere *quali sono le proposte che hanno un reale impatto* attraverso la costruzione di solide fondamenta basate su fatti. L'autore non ha la pretesa di presentare nuovi conti e numeri; per esempio, i libri già menzionati di Goodstein, Lomborg, and Lovelock sono pieni di interessanti numeri e calcoli preconfezionati e poi su internet (si faccia riferimento alle note riportate alla fine di ogni capitolo) ci sono altre utili fonti.

L'obiettivo di questo libro è di rendere i numeri semplici e memorizzabili; di insegnare come calcolarli; di chiarire la situazione in modo che il lettore sarà in grado di arrivare alle proprie conclusioni finali. L'autore non vuole fornire le sue. Le convinzioni sono più forti se sono costruite da sè piuttosto che insegnate. Quando il lettore avrà letto questo libro, si spera che si sentirà in grado di risolvere da solo la questione.

Si ricorda che i calcoli che saremo chiamati a fare contengono deliberatamente un grado di imprecisione. Semplificare è la chiave per capire. In primo luogo, possiamo ricordarci meglio i numeri arrotondandoli a cifra intera. In secondo luogo, i numeri così rappresentati permettono di velocizzare i calcoli. Per esempio, nel corso del libro, la popolazione del Regno Unito e mondiale sarà considerata, rispettivamente, essere composta da 60 milioni e da 6 miliardi di persone. Certamente si è in grado di trovare numeri più accurati ma l'errore non toglie nulla al ragionamento che faremo. Infatti, se sappiamo che le emissioni di gas ad effetto serra nell'anno 2000 sono state di 34 miliardi di tonnellate di CO_2-equivalente all'anno, possiamo immediatamente, senza l'ausilio di nessun calcolatore elettronico, dire che le emissioni medie per persona all'anno sono comprese tra 5 e 6 tonnellate di CO_2-equivalente. Questo dato non è esatto, ma è sufficientemente accurato per essere di aiuto durante interessanti discussioni. Come quelle in cui arriveremo a determinare che un solo volo di andata e ritorno intercontinentale all'anno corrisponde ad un terzo dell'emissione media per persona, se, infatti, prendiamo atto che tale volo emette circa due tonnellate di CO_2 per passeggero, e la media grossolana per persona è un po' più di 5 tonnellate. Dal momento che i numeri sono arrotondati quando sono presentati, se sono utilizzati in un calcolo intermedio il risultato non corrisponderà esattamente alla riposta finale o totale: quelli ottenuti senza approssimazioni intermedie sono più precisi. In ogni caso, queste piccole differenze numeriche non hanno nessuna influenza sulle argomentazioni presentate in questo libro.

I calcoli sono basati sull'esperienza di ogni giorno dell'autore [nei pros-

"Guarda – è l'uomo a basse emissioni di anidride carbonica"

Figura 1.10. Riproduzione per gentile concessione di PRIVATE EYE / Peter Dredge `www.private-eye.co.uk`.

simi capitoli l'esposizione nel testo in prima persona si riferirà all'Autore, (N.d.T)] piuttosto che pescati tra statistiche nazionali impersonali. Per esempio, quando si vorrà stimare la velocità media del vento a Cambridge, ci si chiederà se "la velocità pedalando in bici è generalmente maggiore di quella del vento". La risposta a questa domanda sarà positiva. Quindi si potrà dedurre che nella cittadina inglese solo in casi molto rari la velocità del vento è maggiore di quella dell'Autore quando va in bici, che è di 20 km/h. Queste stime tratte dall'esperienza di ogni giorno sono integrate da calcoli fatti da altre persone e dalle statistiche ufficiali. (Si faccia riferimento per queste alle note poste alla fine di ogni capitolo). Questo libro non vuole essere la raccolta di numeri eccessivamente accurati. Piuttosto, vuole mostrare in che modo utilizzare l'ordine di grandezza dei numeri come elemento alla base per dibattiti costruttivi.

Nel corso dei calcoli, si prenderà come esempio principale il Regno Unito e in qualche occasione l'Europa, l'America o il mondo intero, in ogni caso il lettore dovrebbe essere in grado di rifarli facilmente per qualsiasi altro paese o regione per cui ha interesse.

Concludiamo questo capitolo con ancora poche ulteriori avvertenze finali per il lettore. Non solo i numeri che saranno considerati saranno approssimati, ma anche, si ignoreranno tutti quei dettagli che investitori, manager e economisti, poveri loro, devono considerare. Se si sta cercando di promuovere una tecnologia per l'energia rinnovabile, anche solo un 5% di aumento dei costi può rappresentare un barriera alla sua adozione, perchè nel mondo degli affari ogni minimo dettaglio deve essere tenuto in conto. Ma un 5% di differenza è una grandezza troppo piccola per essere inclusa nello studio presentato in questo libro. Si tratteranno infatti di fattori doppi o grandi dieci volte tanto. Quello che interessa sono i limiti imposti dalla scienza fisica all'energia sostenibile, non la fattibilità economica di oggi. Mentre i dati economici sono in continuo cambiamento, i limiti fondamentali non spariranno. È necessario capire quali siano questi limiti.

I dibattiti sulla politica energetica sono spesso confusi e basati sulle emozioni perchè le persone mettono assieme affermazioni *fattuali* con quelle *etiche*.

Esempi di **affermazioni fattuali** sono: "le emissioni globali legate al consumo di combustibili di origine fossile sono 34 miliardi di tonnellate di anidride carbonica equivalente per anno"; "se la concentrazione di CO_2 raddoppiasse allora la temperatura media aumenterebbe di 1.5 °C–5.8 °C nei prossimi 100 anni"; "l'aumento di 2°C causerebbe lo scioglimento del ghiaccio della Groenlandia nel giro di 500 anni"; "il completo scioglimento del ghiaccio della Groenlandia porterebbe ad un aumento del livello del mare di 7 metri".

Una affermazione fattuale o è falsa o è vera e, anche se la determinazione di *quale di questi due giudizi* sia verificato può essere difficile, rimane una domanda da porre alla scienza. Per esempio, le affermazioni riportate so-

pra sono o vere o false. Anche se non sappiamo se sono tutte vere, alcune al momento sono giudicate "altamente probabili". La difficoltà nel decidere sulla verità delle affermazioni fattuali porta ad aprire delle discussioni all'interno della comunità scientifica. In ogni caso, avendo a disposizione un numero sufficiente di esperimenti e dibattiti scientifici, la questione può essere risolta "al di là di ogni ragionevole dubbio".

Esempi di **affermazioni etiche** sono: " è sbagliato sfruttare risorse globali in modo da imporre alle future generazioni costi significativi"; "non dovrebbe essere permesso di inquinare"; "dovremmo prendere dei provvedimenti per ragionevolmente evitare che la concentrazione di CO_2 raddoppi"; "la politica dovrebbe accordarsi per fissare un limite alle emissioni di CO_2"; "i paesi che presentano la serie storica cumulata di emissioni più grande nel secolo scorso, hanno il dovere di prendere iniziative contro il cambiamento climatico"; "è ragionevole suddividere equamente tra la popolazione del mondo i diritti di emissione di CO_2". Queste affermazioni non sono "o vere o false". Siamo d'accordo con esse in base al nostro giudizio etico, ai nostri valori. Le affermazioni etiche possono essere incompatibili tra loro; per esempio mentre il governo presieduto da Tony Blair annunciò un politica radicale sulle emissioni di CO_2 dichiarando che "il Regno Unito avrebbe ridotto le sue emissioni del 60% al 2050", Gordon Brown, l'allora ministro delle finanze, chiese ai paesi produttori di petrolio di *aumentare* la loro produzione.

"Va bene – siamo d'accordo; annunceremo – 'Non fare niente non è un opzione!' poi aspettiamo e vediamo come le cose si mettono..."

Figura 1.11. Riproduzione per gentile concessione di PRIVATE EYE / Paul Lowe `www.private-eye.co.uk`.

Questo libro pone una particolare enfasi sui fatti e non sull'etica. Si vuole che i fatti siano chiari, in maniera che le persone possano avere un dibattito costruttivo sulle questioni etiche. L'obiettivo è rendere chiaro come i fatti vincolino le opzioni che ci sono possibili. Come ogni buon scienziato, l'Autore ha cercato di tenere per sè le sue idee sulle questioni etiche sebbene ogni tanto, quando non potrà proprio farne a meno le manifesterà – di questo chiede venia in anticipo.

Se sia *giusto* che l'Europa e il Nord America consumino la grande fetta della torta dell'energia, è una questione etica; L'Autore di questo libro ha intrapreso quest'opera, da un lato, per ricordare al lettore che è un *fatto* che noi non possiamo avere la botte piena e la moglie ubriaca e, dall'altro, per aiutarlo a stanare *con i fatti* le proposte di politiche energetiche inefficaci e senza senso individuando quelle [efficaci] che sono compatibili con i propri valori personali.

Abbiamo bisogno di un piano che faccia la differenza!

Note ed approfondimenti

Alla fine di ogni capitolo si forniscono i dettagli delle idee esposte nello stesso, le fonti dei dati e delle citazioni e rimandi a approfondimenti ulteriori.

p.

2 *"...non c'è nessun'altra possibilità di farcela se non attraverso le energie rinnovabili"*; *"chiunque faccia affidamento sulle energie rinnovabili per soddisfare il bisogno [energetico] sta vivendo nel mondo dei sogni ed è un nemico del popolo"*. Le citazioni sono

tratte dalla trasmissione radio del canale 4 della BBC *Any Questions?*, del 27 gennaio 2006, [ydoobr] . *Michael Meacher* è stato ministro dell'ambiente del governo inglese dal 1997 fino al 2003. *Sir Bernard Ingham* è stato assistente del primo ministro Margaret Thatcher ed è stato responsabile dei servizi di informazioni del governo [Head of the Government Information Service, in inglese, (N.d.T.)]. È segretario del gruppo Supporters of Nuclear Energy [Amici dell'energia nucleare, (N.d.T)].

3 *Jonathan Porritt* (Marzo 2006). *La riposta è il nucleare?* Sezione 3. Nota per i ministri. www.sd-commission.org.uk

– *"il nucleare è un pozzo di denaro senza fine"*, *"abbiamo* abbondanza *di onde marine e di vento".* Le citazioni sono della giornalista Ann Leslie nel corso della trasmissione radio del canale 4 della BBC *Any Questions?* del 10 febbraio 2006.

– *Gli abitanti di Los Angeles guidano . . . dalla Terra a Marte* – (The Earthworks Group, 1989, pagina 34).

4 targetneutral.com richiede solo 4£ per "neutralizzare" una tonnellata di CO_2. (È il prezzo significativamente più basso che l'autore ha trovato, rispetto ad altri servizi simili). A questi costi ogni cittadino medio inglese potrebbe 'neutralizzare" le sue 11 tonnellate annue con appena una spesa di 44£ all'anno! A dimostrazione che il piano di BP non ha un impatto reale è il fatto che questo progetto non ha raggiunto la certificazione Gold Standard www.cdmgoldstandard.org (Fonte: comunicazione personale con Michael Schlup). La giornalista Fiona Harvey del Financial Times ha descritto come molti di questi tipi di schemi di riduzione delle emissioni siano senza valore [2jhve6].

– *Le persone che vogliono promuovere le energie rinnovabili rispetto al nucleare affermano che "i parchi eolici sul mare potrebbero fornire energia elettrica sufficiente per tutte le case inglesi".* Alla fine del 2007, il governo inglese ha annunciato che avrebbe rilasciato il permesso per costruire parchi eolici sul mare "sufficienti per alimentare tutte le case del Regno Unito". L'attivista per le energie rinnovabili, Nick Rau, dell'associazione Friends of the Earth ha affermato che il suo gruppo accoglieva con favore questo annuncio, aggiungendo che "La potenza che potrebbe essere generata da questa industria è enorme. [25e59w]. Sul quotidiano Guardian [5o7mxk], John Sauven, direttore esecutivo di Greenpeace, affermò che i piani equivalevano ad una "rivoluzione dell'energia eolica". E che "il partito laburista deve smetterla con la sua idea fissa dell'energia nucleare, che potrebbe solo ridurre le emissione del 4% in un qualche momento di un futuro distante". Nick Rau commentò: "siamo molto soddisfatti che il governo stia facendo sul serio sul potenziale dell'eolico sul mare che potrebbe generare il 25% dell'energia elettrica del Regno Unito dal 2020". Qualche settimana più tardi, il governo annunciò che avrebbe dato il via libera alla costruzione di nuove centrali nucleari. L'associazione Friends of the Earth affermò che "la decisione odierna di permettere di andare avanti con la nuova generazione di centrali nucleari . . . farà ben poco per affrontare il cambiamento climatico" [5c4olc].
In realtà i due piani proposti – quello dell'eolico sul mare e quello nucleare – avrebbero entrambi prodotto la stessa quantità di elettricità all'anno. Il totale permesso per l'eolico offshore vale 33 GW che in media produce circa 10 GW e che, quindi, equivale a 4 kWh al giorno per persona; ancora sulla stessa scia, gli attivisti anti-nucleari affermano che l'opzione nucleare farebbe "poco" mentre quella eolica potrebbe "alimentare tutte le case del Regno Unito". Il fatto è che le due affermazioni, "alimentare tutte le case inglesi" e "ridurre le emissioni solo del 4%", sono equivalenti.

5 *"l'automobile alimentata ad acqua"* si trova riportata sulla rivista *New Scientist* del 29 luglio 2006 a p. 35. L'articolo, intitolato "L'auto alimentata ad acqua potrebbe essere disponibile dal 2009", inizia in questo modo:
"Dimenticatevi le auto alimentate ad alcool o ad olio vegetale. Prima, potreste essere in grado di guidare la vostra auto con niente altro che acqua nel serbatoio. Potrebbe essere il veicolo definitivamente a zero emissioni".
"Mentre, da un lato, l'acqua non è a prima vista una fonte di energia ovvia, dall'altro, possiede una proprietà fondamentale: è un abbondante sorgente di idrogeno, proprio quell'elemento largamente considerato come il carburante verde del futuro".
Il lavoro descritto dalla rivista *New Scientist* non era ridicolo – si trattava di un'auto che utilizzava il *boro* come carburante e una reazione boro/acqua come primo passo di una reazione chimica. Perchè il *New Scientist* ha sentito la necessità di trasformare questo in una storia che suggeriva che l'acqua era il carburante? L'acqua non lo è. Non lo è mai stato e mai lo sarà. È già stata bruciata! La prima legge della termodinamica afferma che non si può generare energia dal niente: si può solo trasformare una forma di energia in un'altra. L'energia in ogni motore deve essere generata da qualche parte. Fox News ha dato spazio ad una storia ancora più assurda [2fztd3].

– *Il cambiamento climatico è "una minaccia più grande del terrorismo*. Sir David King, Chief Scientific Advisor del governo inglese, gennaio, 2004. [26e8z]

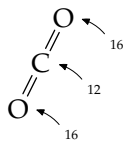
5 *la glorificazione dei viaggi* – è un allusione al reato di "glorificazione" così come definito nella legge anti-terrorismo inglese [Terrorism Act, in inglese, (N.d.T)] approvata il 13 aprile 2006. [ykhayj]

6 *Figure 1.2*. Questo grafico mostra la produzione di greggio inclusa la frazione del gas naturale estratto a bocca di pozzo per mezzo di separatori, prodotti liquidi da impianti di conversione del gas naturale e i guadagni [volumetrici] provenienti dalla conversione del greggio in prodotti finali. Fonti: EIA, e "BP statistical review of world energy".

8 *Il primo motore a vapore di uso pratico fù inventato nel 1698*. In realtà, Hero di Alessandria descrisse un motore a vapore ma dal momento che l'idea non ebbe nessun seguito nei 1600 anni successivi, l'autore assegna a Savery nel 1698 l'invenzione del primo motore a vapore *di uso pratico*.

7 *Figure 1.4 e 1.7: Grafici sulla concentrazione di anidride carbonica*. I dati sono raccolti da varie pubblicazioni: Keeling and Whorf (2005) (periodo delle misure 1958–2004), Neftel et al. (1994) (periodo delle misure 1734–1983), Etheridge et al. (1998) (periodo delle misure 1000–1978), Siegenthaler et al. (2005) (periodo delle misure 950–1888 d.C.), e Indermuhle et al. (1999) (da 11 000 a 450 anni prima del tempo presente). Questo grafico, in ogni caso, non dovrebbe essere confuso con quello a "forma di mazza da hockey" che mostra la serie storica delle *temperature* globali. I lettori attenti avranno notato che nel presentare i dati sul cambiamento climatico non si è mai fatta menzione alla *serie storica* delle temperature.
Figure 1.5–1.7: Produzione di carbone i dati sono raccolti da varie pubblicazioni: Jevons (1866), Malanima (2006), Netherlands Environmental Assessment Agency (2006), National Bureau of Economic Research (2001), Hatcher (1993), Flinn and Stoker (1984), Church et al. (1986), Supple (1987), Ashworth and Pegg (1986). Jevons è stato il primo autore a menzionare il "picco del petrolio". Nel 1865 stimò le riserve di carbone inglesi ancora facilmente accessibili, studiò la crescita esponenziale del consumo e predisse la fine della crescita esponenziale e la fine del dominio inglese dell'industria mondiale. "Non possiamo mantenere a lungo il nostro attuale tasso di crescita di consumo. ... l'arresto improvviso del nostro progresso diventerà tangibile nel giro di un secolo a partire dal tempo presente. ... la conclusione è inevitabile, la nostra presente condizione di felice progresso è qualche cosa di durata limitata." Jevons ebbe ragione. Nel giro di un secolo la produzione di carbone inglese raggiunse il picco massimo e ci furono due guerre mondiali.

11 *Dominic Lawson, un opinionista del quotidiano Independent*. La citazione è un adattamento dell'articolo scritto l'8 giugno 2007 da Dominic Lawson sul giornale *Independent*.
La citazione non riporta tutto il testo per motivi di spazio ma si è fatto attenzione a non correggere nessuno degli errori. *Tutti e tre i numeri menzionati sono sbagliati*. Ecco come ha fatto confusione. Primo, ha fatto riferimento all'"anidride carbonica" ma ha dato i numeri del carbonio: la combustione dei combustibili fossili rilascia *26* giga-tonnellate di CO_2 nell'aria all'anno (non 7). È un errore comune. Secondo, afferma che l'oceano emette 36 000 giga-tonnellate di anidride carbonica all'anno nell'atmosfera. Questo è addirittura un errore peggiore: questo numero è l'*ammontare totale* di carbonio nell'oceano! Il *flusso* annuale è molto più piccolo – circa 90 giga-tonnellate (ovvero 330 Gt CO_2/anno) secondo i diagrammi standard del ciclo del carbonio [16y5g] (l'autore stima che il valore di 90 Gt C/anno sia la stima del flusso nel caso in cui l'atmosfera dovesse avere la concentrazione di CO_2 ridotta improvvisamente a zero). In maniera simile il suo flusso di "1900 giga-tonnellate" dalla biosfera all'atmosfera è errato. Il numero corretto è circa 120 giga-tonnellate di carbonio all'anno (440 Gt CO_2/anno).



I pesi di un atomo di carbonio e di una molecola di CO_2 sono in rapporto di 12 a 44, perchè l'atomo di carbonio pesa 12 unità e due atomi di ossigeno pesano 16 unità ognuna. $12 + 16 + 16 = 44$.

Per inciso, l'aumento osservato della concentrazione di CO_2 è in perfetta linea con quanto ci si aspetterebbe, ipotizzando che la maggior parte delle emissioni di origine umana permangono nell'atmosfera. Dal 1715 al 2004 si stima che siano stati rilasciati nell'atmosfera 1160 Gt CO_2 derivanti dall'utilizzo di combustibili fossili e dalla produzione di cemento (Marland et al., 2007). Se *tutta* questa CO_2 fosse rimasta nell'atmosfera, la concentrazione sarebbe cresciuta di 160 ppm (da 280 a 440 ppm). L'aumento misurato è stato di circa 100 ppm (da 275 a 377 ppm). Quindi, circa il 60% di quello che è stato emesso, è ancora presente nell'atmosfera.

12 *L'anidride carbonica ha un effetto riscaldante*. Il dibattito basato molto sulle emozioni riguardo a questo tema sta diventando noioso, non è vero? Si sente affermare "È scientificamente certo." "No non è così!" "Sì è così!". Forse, per quelli che desiderano smetterla con questo modo di argomentare fatto di grida, la cosa migliore è fare riferimento ad un succinto documento redatto da Charney et al. (1979). Le conclusioni a cui arriva sono di peso perchè lo studio è stato commissionato dalla National Academy of Sciences (l'equivalente statunitense della Royal Society inglese) [equivalente al Consiglio nazionale delle Ricerche -CNR- italiano, (N.d.T.)] e i suoi autori sono stati selezionati in base alle loro conoscenze "con particolare riguardo alla selezione di un mix bilanciato [delle stesse]". Il gruppo di studio è stato messo assieme "sotto gli auspici del Climate Research Board [Comitato per la Ricerca sul Clima, (N.dT.)] del National Research Council con lo scopo di valutare le basi scientifiche per stimare possibili futuri cambiamenti climatici indotti dalle emissioni di anidride carbonica prodotte da attività umane". In particolare, al gruppo di studio è stato chiesto "di individuare le principale ipotesi sulle quali l'attuale comprensione della questione si basa, di valutare quantitativamente l'adeguatezza e il grado di incertezza della nostra conoscenza di questi fattori e processi e di riassumere in maniera concisa e obiettiva il migliore attuale livello di comprensione del problema della relazione tra anidride carbonica e cambiamento climatico a beneficio del legislatore".
Lo studio consta di appena 33 pagine e si può scaricare liberamente all'indirizzo [`5qfkaw`], cosa che si raccomanda al lettore di fare. Si illustra chiaramente quali basi scientifiche erano state già state definite nel 1979 e quali presentano ancora un grado di incertezza.
I principali punti si possono riassumere nel seguente modo. Primo, raddoppiando la concentrazione di CO_2 nell'atmosfera si arriverebbe a modificare il riscaldamento netto della troposfera, degli oceani e delle terre emerse con una potenza media per unità di area di circa $4\,W/m^2$, se tutte le altre proprietà dell'atmosfera rimanessero invariate. Questo effetto riscaldante può essere messo a confronto con quella che è la potenza media assorbita dall'atmosfera, le terre e gli oceani, che risulta essere di $238\,W/m^2$. In questo modo, il raddoppio della concentrazione di CO_2 avrebbe un effetto riscaldante equivalente a quello legato ad un aumento dell'intensità del sole di $4/238 = 1.7\%$. Secondo, le conseguenze del riscaldamento indotti da CO_2 sono difficili da prevedere, tenuto conto della complessità del sistema atmosfera/oceano, ma gli autori del rapporto predicono un riscaldamento globale della superficie compreso tra 2 °C e 3.5 °C, con punte maggiori alle alte latitudini. Infine, gli studiosi concludono: "ci abbiamo provato ma non siamo stati in grado di trovare alcuno effetto fisico più o meno importante che possa ricondurre a proporzioni insignificanti o a ribaltare le stime sugli effetti del riscaldamento globale legato al raddoppio della concentrazione di CO_2 nell'atmosfera". E avvertono che, grazie all'azione dell'oceano, "Il grande e enorme volano del sistema climatico globale", è abbastanza probabile che il riscaldamento potrebbe avvenire in maniera sufficientemente lenta tale che sarebbe difficile rilevarlo nelle prossime decadi. In ogni caso "il riscaldamento alla fine si concretizzerà e i cambiamenti climatici regionali associati ... potrebbero essere molto significativi".
L'introduzione del presidente del Climate Research Board, Verner E. Suomi, fa il riassunto delle conclusioni con una famosa concatenazione di doppie negazioni. "Se l'anidride carbonica continua a crescere, il gruppo di studio non ha ragione di dubitare che il cambiamento climatico avverrà e non ha ragione di credere che questi cambiamenti saranno piccoli".

– *le litanie sugli effetti drastici a cui stiamo andando incontro, dal momento che dovrebbero essere state sentite da altre parti.* Si veda in proposito [`2z2xg7`] nel caso non sia vero.

14 *Suddivisione delle emissioni mondiali di gas ad effetto serra per regione e per nazione*. Fonte dei dati: Climate Analysis Indicators Tool (CAIT) Version 4.0. (Washington, DC: World Resources Institute, 2007). La prima delle tre figure mostra i totali nazionali di tutti e sei i più rilevanti gas ad effetto serra (CO_2, CH_4, N_2O, PFC, HFC, SF_6), ad esclusione

dei contributi legati al cambio di destinazione d'uso del suolo e alle foreste. Il grafico di p16 mostra solo le emsissoni cumulate di CO_2.

16 *Congratulazioni alla Gran Bretagna! ... storicamente le sue emissioni, per persona, sono seconde solo agli Stati Uniti.*. Si offrono le scuse più sincere al Lussemburgo, le cui emissioni storiche pro-capite eccedono quelle dell'America e del Regno Unito; ma l'Autore pensa che il podio dei vincitori debba essere meritatamente assegnato a quei paesi che presentano emissioni grandi sia pro-capite sia totali. In termini totali, i più grandi produttori storici di emissioni sono, nell'ordine, gli USA (322 Gt CO_2), la Federazione Russa (90 Gt CO_2), la Cina (89 Gt CO_2), la Germania (78 Gt CO_2), il Regno Unito (62 Gt CO_2), il Giappone (43 Gt CO_2), la Francia (30 Gt CO_2), l'India (25 Gt CO_2), e il Canada (24 Gt CO_2). L'ordine secondo la misura pro-capite è: Lussemburgo, USA, Regno Unito, Repubblica Ceca, Belgio, Germania, Estonia, Qatar, e Canada.

17 *Alcuni paesi, tra cui la Gran Bretagna, si sono impegnati a ridurre, per lo meno del 60% le loro emissioni di gas ad effetto serra per il 2050*. In realtà mentre l'autore stava scrivendo questo testo, l'impegno della Gran Bretagna è stato aumentato fino all'80% rispetto ai livelli di emissione del 1990.

– *Figura 1.8*. Nello scenario inferiore, la probabilità che l'aumento della temperatura *superi* i 2 °C è stimato tra il 9–26%; le emissioni cumulate di carbonio dal 2007 in avanti sono di 309 Gt C; la concentrazione di CO_2 raggiunge un picco di 410 ppm, mentre quello della concentrazione di CO_2e di 421 ppm, e nell'anno 2100 le concentrazioni di CO_2 ridiscendono a 355 ppm. Nello scenario superiore, invece, la probabilità dell'aumento di 2 °C è valutata tra 16–43%; le emissioni cumulate di carbonio dal 2007 in avanti sono di 415 Gt C; la concentrazione di CO_2 raggiunge un picco di 425 ppm, mentre quello della concentrazione di CO_2e di 435 ppm, e nell'anno 2100 le concentrazioni di CO_2 ridiscendono a 380 ppm. Si veda anche `hdr.undp.org/en/reports/global/hdr2007-2008/`.

19 *su internet ci sono altre utili fonti.* Si raccomanda, per esempio: *Statistical Review of World Energy* della società BP [`yyxq2m`], La commissione per lo sviluppo sostenibile [Sustainable Development Commission, in inglese, (N.d.T.)], `www.sd-commission.org.uk`, L'associazione danese dell'industria eolica, `www.windpower.org`, Ambientalisti per l'energia nucleare, `www.ecolo.org`, Dipartimento dell'energia eolica della Università Risø, `www.risoe.dk/vea`, DEFRA `www.defra.gov.uk/environment/statistics`, in particolare il libro *Avoiding Dangerous Climate Change* [Evitare un cambio pericoloso del clima, (N.d.T.)] [`dzcqq`], the Pembina Institute, `www.pembina.org/publications.asp` e DTI (conosciuto ora come BERR) `www.dti.gov.uk/publications/`.

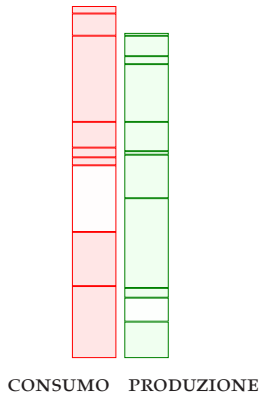
20 *affermazioni fattuali e affermazioni etiche...*
Le affermazioni etiche sono conosciute come "dichiarazioni normative" o "giudizi di valore", le affermazioni fattuali sono conosciute come "dichiarazioni positive". Le affermazioni etiche, solitamente, contengono verbi quali "dovere" ["should", in inglese, (N.d.T.)] - inteso in senso primariamente morale- o "dovere" ["must", in inglese, (N.d.T.)] - inteso come derivante da un obbligo non prettamente morale- o anche aggettivi come "corretto", "giusto", "errato". Si veda per utili ulteriori approfondimenti Dessler and Parson (2006).

21 *Gordon Brown.* Il 10 settembre 2005, Gordon Brown ha affermato che l'alto prezzo del petrolio rappresentava un rischio significativo per l'economia europea e per la crescita globale e sollecitava l'OPEC ad aumentarne la produzione. Sei mesi più tardi dichiarava ancora: "abbiamo bisogno ... di maggiore produzione, trivellazioni, investimenti in particolare nel settore petrolchimico" (22 Aprile 2006) [`y98ys5`]. L'Autore vuole attenuare queste osservazioni critiche su Gordon Brown esprimendo il suo giudizio positivo su una delle sue ultime iniziative, ovvero la promozione di vetture elettriche ed ibride ricaricabili. Come il lettore avrà modo di vedere, una delle conclusioni di questo libro è che l'elettrificazione della maggior parte dei trasporti rappresenta un buona fetta di un piano per smettere di utilizzare carburanti fossili.

2 Il bilancio

La Natura non può essere ingannata.

Richard Feynman



Parliamo di consumo e produzione dell'energia. Al momento, la maggior parte dell'energia che il mondo sviluppato consuma è prodotta da combustibili fossili e questo non è sostenibile. Quanto tempo esattamente potremo continuare a vivere dipendendo dai combustibili fossili è una domanda interessante, ma non è la questione che dà l'indirizzo a questo libro. Desidero porre la riflessione sul *vivere senza combustibili fossili*.

Faremo due blocchi. A sinistra, nel blocco rosso, aggiungeremo il nostro consumo di energia, mentre a destra, nel blocco verde, aggiungeremo la produzione di energia sostenibile. Monteremo le due pile a poco a poco, aggiungendo gradualmente gli elementi man mano che verranno discussi.

La questione affrontata in questo libro è: "possiamo *ragionevolmente* vivere in modo sostenibile?". Sommeremo, quindi, tutte le fonti *possibili* di energia sostenibile e le metteremo a destra, nella pila verde.

A sinistra, nella pila rossa, stimeremo il consumo di una "tipica persona moderatamente benestante"; vi incoraggio a quantificare una previsione del *vostro* consumo creando in aggiunta una pila di sinistra personalizzata. In seguito scopriremo anche l'attuale consumo medio di Europei ed Americani. Allorché facciamo una stima del nostro consumo di energia per riscaldamento, trasporto, attività manifatturiere, e così via, il fine non è solo quello di calcolare un numero per il blocco di sinistra del nostro bilancio, ma anche quello di capire da che cosa ogni numero dipende, ed in che modo è suscettibile di modifica.

Alcune forme principali di consumo per la pila di sinistra saranno:

- trasporto
  - auto, aereo, merci
- riscaldamento e raffrescamento
- illuminazione
- sistemi informatici ed altri gadget
- cibo
- manifatturiero

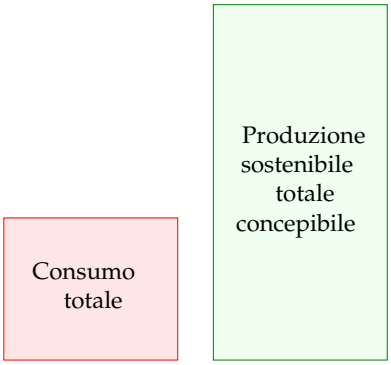
Nella pila di destra concernente la produzione sostenibile le categorie principali saranno

- eolico
- solare
  - fotovoltaico, termico, da biomasse
- idroelettrico
- onde
- maree
- geotermico
- nucleare? (con un punto interrogativo perché non è subito chiaro quanto sia da considerarsi "sostenibile")

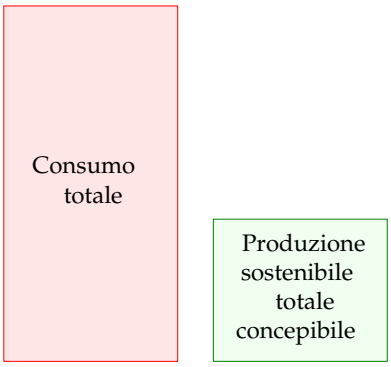
A destra, nel blocco verde, aggiungeremo le stime di produzioni sostenibili per il Regno Unito. Questo ci permetterà di rispondere alla domanda: "è plausibile che il Regno Unito viva sulle proprie fonti rinnovabili?".

Se le fonti di energia sostenibile che abbiamo impilato sulla destra siano *economicamente* realizzabili è una questione importante, ma lasciamola da parte al momento. ed iniziamo semplicemente con l'aggiungere i primi due blocchi. A volte le persone si concentrano troppo sulla fattibilità economica e perdono di vista il quadro generale. Ad esempio, la gente si disputa chiedendosi: "è il vento più a buon mercato del nucleare?" e dimentica di chiedersi "*quanto* vento è disponibile?" oppure "quanto uranio è rimasto?".

Il risultato è possibile che appaia in questo modo:



Se salta fuori che il consumo è molto inferiore ad una produzione sostenibile concepita razionalmente, allora è possibile dire: "bene, *forse* possiamo vivere in modo sostenibile; diamo un'occhiata ai costi economici, sociali ed ambientali delle alternative sostenibili e capiamo quali di esse meritano maggiore ricerca e sviluppo. Se facciamo un buon lavoro, non ci sarà, *forse*, alcuna crisi energetica". D'altro canto, il risultato delle nostre somme potrebbe apparire così:



– un quadro desolante, molto. Questa immagine dice: "non importa quale sia l'economicità della potenza sostenibile, semplicemente *non c'è abbastanza* potenza sostenibile per supportare il nostro stile di vita corrente. Grandi cambiamenti sono in arrivo".

Energia e potenza

La maggior parte delle discussioni sul consumo e la produzione di energia sono rese incomprensibili dal proliferare delle *unità di misura* in cui energia e potenza vengono espresse: dalle "tonnellate equivalenti di petrolio" ai "tera-watt-ora" (TWh), fino agli "exa-joule" (EJ). Nessuno, tranne uno specialista, ha la consapevolezza di quello che "un barile di petrolio" o "un milione di BTU" significhi in termini umani. In questo libro, esprimeremo tutto in un unico insieme di unità di misura personali, alle quali chiunque possa rapportarsi.

L'unità di misura dell'**energia** che ho scelto è il chilowattora (kWh). Questa quantità prende sulla bolletta elettrica il nome di "un'unità" e costava ad un utente domestico del Regno Unito circa 10p, nel 2008 [100 pence fanno 1 sterlina. (N.d.T.)]. Come vedremo, la maggior parte delle scelte individuali quotidiane coinvolgono quantità di energia pari a un numero piccolo di chilowattora.

Laddove discuteremo di **potenza** (velocità con cui si utilizza o produce energia), l'unità principale sarà il chilowattora al giorno (kWh/gg). Utilizzeremo anche di tanto in tanto il watt ($40\,\mathrm{W} \simeq 1\,\mathrm{kWh/gg}$) e il chilowatt ($1\,\mathrm{kW} = 1000\,\mathrm{W} = 24\,\mathrm{kWh/gg}$), come spiegherò di seguito. Il chilowattora al giorno è una bella unità a misura d'uomo: la maggior parte delle

attività personali ad alto consumo trangugiano energia al ritmo di un numero piccolo di chilowattora al giorno. Ad esempio, una lampadina da 40 W, tenuta sempre accesa, utilizza **un** chilowattora al giorno. Alcune società elettriche includono nelle loro bollette dell'elettricità dei grafici, che illustrano il consumo di energia in chilowattora al giorno. Io userò la medesima unità di misura per tutte le forme di potenza e non esclusivamente per quella elettrica. Consumo di petrolio, consumo di gas, consumo di carbone: misurerò tutte queste potenze in chilowattora al giorno. Vorrei chiarire questo punto: per alcune persone, la parola "potenza" si riferisce solo al consumo di energia *elettrica*. Ma questo libro riguarda *tutte* le forme di consumo e di produzione dell'energia ed io userò la parola "potenza" per tutte queste molteplici forme.

Figura 2.1. Distinzione tra energia e potenza. Ognuna di queste lampadine da 60 W ha una *potenza* di 60 W quando è accesa; non ha una "energia" di 60 W. La lampadina utilizza 60 W di *potenza* elettrica, quando è accesa, ovvero emette 60 W di *potenza* sotto forma di luce e calore (soprattutto quest'ultimo).

Un chilowattora al giorno è approssimativamente la potenza che si potrebbe ottenere da uno schiavo umano. Il numero di chilowattora al giorno che utilizzate è, quindi, il numero effettivo dei servi alle vostre dipendenze.

Nel linguaggio comune la gente usa indifferentemente i due termini energia e potenza, ma in questo libro dobbiamo attenerci rigorosamente alla loro definizione scientifica. *La potenza è la velocità alla quale si utilizza l'energia*.

Forse un buon modo di spiegare i concetti di energia e potenza è per mezzo di un'analogia con l'acqua ed il flusso dell'acqua che esce dai rubinetti. Se si desidera un bicchiere d'acqua, si vuole un certo *volume* d'acqua – un litro, forse (se si è assetati). Quando si apre un rubinetto, si crea un *flusso* di acqua – un litro al minuto, diciamo, se ne esce solo un filo; oppure 10 litri al minuto da un rubinetto "più generoso". È possibile ottenere lo stesso volume (un litro), vuoi facendo gocciolare il rubinetto per un minuto, vuoi tenendolo completamente aperto per un decimo di minuto. Il *volume* erogato in un certo periodo è uguale al *flusso* moltiplicato per il *tempo*:

$$\text{volume} = \text{flusso} \times \text{tempo}.$$

Diciamo che il *flusso* è il *tasso* al quale il *volume* viene erogato. Se si conosce il volume erogato in un certo periodo, si ottiene il flusso dividendo il volume per tale intervallo di tempo:

$$\text{flusso} = \frac{\text{volume}}{\text{tempo}}.$$

Ecco qui il collegamento con energia e potenza. L'*energia* è come il *volume* dell'acqua; la *potenza* è come il *flusso* dell'acqua. Ad esempio, ogniqualvolta un tostapane viene acceso, inizia a consumare *potenza* ad un tasso di un chilowatt e continua a consumarne un chilowatt fino allo spegnimento. Per metterla in un altro modo, il tostapane (nel caso sia lasciato permanentemente accesso) consuma un chilowattora (kWh) di energia all'ora, ovvero 24 chilowattora al giorno.

Più a lungo il tostapane rimane acceso, maggiore è l'energia che utilizza. È possibile calcolare l'energia utilizzata da una particolare attività

Il volume è misurato in litri	Il flusso è misurato in litri al minuto
L'energia è misurata in kWh	La potenza è misurata in kWh al giorno
L' energia è misurata in kWh oppure MJ	La potenza è misurata in kWh al giorno oppure kW oppure W (watt) oppure MW (megawatt) oppure GW (gigawatt) oppure TW (terawatt)

moltiplicando la potenza per la durata:

$$\text{energia} = \text{potenza} \times \text{tempo}.$$

Il joule è l'unità di misura standard per l'energia nel Sistema Internazionale, ma purtroppo è eccessivamente piccola perché torni utile al nostro lavoro. Un chilowattora equivale a 3.6 milioni di joule (3.6 mega-joule).

La potenza è così utile ed importante da avere qualcosa che il flusso d'acqua non possiede: unità di misura peculiari. Quando si parla di un flusso, possiamo misurarlo in "litri al minuto", "galloni per ora" o "metri cubi al secondo", i nomi di queste unità mettono in chiaro che il flusso è un "volume per unità di tempo". Una potenza di *un joule al secondo* è detta *un watt*. 1000 joule al secondo sono chiamati un chilowatt. Usiamo la terminologia nel modo corretto: si dice che il tostapane impiega un chilowatt, non che utilizza "un chilowatt al secondo". Il termine "al secondo" è già contenuto nella definizione di chilowatt: un chilowatt significa "un chilo-joule al secondo". Allo stesso modo si dice che "una centrale elettrica nucleare genera un gigawatt". Un giga-watt, tra l'altro, è un miliardo di watt, un milione di chilowatt, ossia 1000 megawatt. Di conseguenza un giga-watt è un milione di tostapane. E la "g" iniziale in gigawatt si pronuncia dura, come se fosse scritto "ghigawatt". E, finché ci sono io alla lavagna, si mettono la "g" e la "w" maiuscole in "giga-watt" solo quando si scrive l'abbreviazione "GW".

Per favore, non dite mai, in nessun caso, "un chilowatt al secondo", "un chilowatt all'ora" o "un chilowatt al giorno"; nessuna di queste è una misura valida della potenza. L'impulso che le persone hanno di dire "a/per qualcosa" quando si parla del loro tostapane è uno dei motivi per cui ho deciso di usare il "chilowattora al/per giorno" come unità di misura personale della potenza. Mi dispiace solo che sia un po' macchinoso da dire ed ingombrante da scrivere.

Ecco un'ultima cosa da mettere in chiaro: se io dico che "qualcuno ha utilizzato un giga-wattora di energia", sto semplicemente dicendo *quanta* energia ha usato, non *quanto velocemente* l'ha usata. Parlare di giga-wattora *non* implica che l'energia sia utilizzata *in un'ora*. È possibile utilizzare un giga-wattora di energia tenendo accesi un milione di tostapane per un'ora, o 1000 tostapane per 1000 ore.

Come accennato, prenderemo l'abitudine di citare le potenze in kWh/gg *per persona*. Una delle ragioni per preferire queste unità di misura personali è che rendono molto più facile passare dal parlare del Regno Unito al parlare di altri Paesi o regioni. Per esempio, immaginate che si stia discutendo di incenerimento dei rifiuti e si venga a sapere che mentre nel Regno Unito questo processo di termo-valorizzazione fornisce una potenza di 7 TWh all'anno, in Danimarca ne eroga 10 TWh/anno. Tutto questo ci aiuta ad affermare che la Danimarca brucia "più" rifiuti del Regno Unito? Sebbene possa essere un dato interessante la potenza totale prodotta dai rifiuti in ciascun Paese, credo che ciò che di solito si vuole conoscere

1 TWh (un tera-wattora) equivale ad un miliardo di kWh.

sia l'ammontare dell'incenerimento dei rifiuti *per persona*. (Per la cronaca, ecco i dati: Danimarca, 5 kWh/gg per persona; Regno Unito, 0.3 kWh/gg per persona. Dunque i Danesi bruciano circa 13 volte più rifiuti dei Britannici.) Per risparmiare inchiostro, a volte abbrevierò "per persona" con "/p". Discutendo di tutto per-persona sin dall'inizio, si finisce con l'avere un libro più trasportabile, che si spera sia assai utile in tutto il mondo per discussioni sull'energia sostenibile.

Dettagli per i più esigenti

Ma l'energia non si conserva? Parliamo di "usare" l'energia, ma una delle leggi della natura non dice che l'energia non può essere creata né distrutta?

Sì, sono stato impreciso e continuerò ad esserlo. In realtà, questo è un libro sull'*entropia* – una cosa più complicata da spiegare. Quando noi "usiamo" un chilojoule di energia, quello che stiamo davvero facendo è prendere un chilojoule di energia in una forma che ha *bassa entropia* (per esempio, l'elettricità) e *convertirlo* in una quantità esattamente uguale di energia sotto altra forma, di solito una che ha entropia molto più alta (ad esempio, aria calda o acqua calda). Quando abbiamo "usato" l'energia, essa è ancora lì, ma normalmente non possiamo "usare" l'energia più e più volte, dato che solo l'energia a *bassa entropia* ci è "utile". A volte questi diversi "gradi" di energia si distinguono per l'aggiunta di un'etichetta alle unità di misura: un kWh(e) è un chilowattora di energia elettrica – energia della migliore qualità. Un kWh(th) è un chilowattora di energia termica – per esempio l'energia in dieci litri di acqua bollente. L'energia nascosta nelle cose che hanno temperature elevate è più utile (entropia inferiore) di quella nelle cose tiepide. Un terzo tipo di energia è l'energia chimica. L'energia chimica è di alta qualità esattamente come l'energia elettrica.

Parlare di energia piuttosto che di entropia significa non seguire la via maestra della precisione, ma una comoda scorciatoia, un po' sdrucciolevole: è un escamotage pratico ma non del tutto preciso, che useremo quasi sempre in questo libro. Di tanto in tanto, dovremo abbandonare questo modo di fare "sciatto" ed essere "raffinati", ad esempio, allorché discuteremo di refrigerazione, centrali elettriche, pompe di calore o energia geotermica.

Non è che si stanno confrontando le mele con le pere? È valido mettere a confronto differenti forme di energia quali l'energia chimica immessa in un'automobile alimentata a benzina e l'elettricità generata da una turbina eolica?

Nel confrontare l'energia consumata con quella ipoteticamente prodotta, non voglio dire che tutte le forme di energia sono equivalenti ed intercambiabili. L'energia elettrica prodotta da una turbina eolica è di nessuna utilità per un motore a benzina e la benzina è inutile se si vuole alimentare

un televisore. In linea di principio, l'energia può essere convertita da una forma all'altra, benché la conversione comporti delle perdite. Le centrali elettriche a combustibili fossili, ad esempio, trangugiano *energia chimica* e producono *elettricità* (con un rendimento del 40% o giù di lì). E gli impianti per la produzione dell'alluminio tracannano *energia elettrica* per creare un prodotto ad alta *energia chimica* – l'alluminio (con un rendimento del 30% o giù di lì).

In alcuni documenti di sintesi sui consumi e la produzione di energia, tutte le differenti forme di energia sono poste nelle medesime unità di misura, ma vengono introdotti dei moltiplicatori, classificando l'energia elettrica da idroelettrico, per esempio, con un valore 2.5 volte superiore all'energia chimica nel petrolio. Questo lievitare del valore energetico effettivo dell'elettricità può essere giustificato dicendo: "1 kWh di elettricità equivale a 2.5 kWh di petrolio, dato che se mettessimo quella quantità di petrolio in una centrale elettrica standard, questa fornirebbe il 40% di 2.5 kWh, ossia 1 kWh di elettricità". In questo libro, tuttavia, generalmente userò un fattore di conversione uno-a-uno, quando si confronteranno varie forme di energia. *Non* è affatto vero che 2.5 kWh di petrolio siano inevitabilmente equivalenti ad 1 kWh di elettricità; questo è quello che accadrebbe in un mondo dove il petrolio è utilizzato solo per produrre elettricità. Sì, è vero che la conversione di energia chimica in energia elettrica è fatta con questo tasso di cambio particolarmente inefficiente. Ma l'energia elettrica può anche essere convertita in energia chimica. In un mondo alternativo (forse non lontano) con elettricità relativamente abbondante e poco petrolio, si potrebbe usare l'elettricità per produrre combustibili liquidi; in quel mondo non utilizzeremmo di certo lo stesso tasso di cambio – ogni kWh di benzina ci costerebbe allora qualcosa come 3 kWh di energia elettrica! Penso che un modo intramontabile nonché scientifico di riassumere e confrontare le energie sia quello di tenere 1 kWh di energia chimica come equivalente ad 1 kWh di energia elettrica. La mia scelta di utilizzare questa conversione uno-a-uno implica che alcune delle mie somme avranno un aspetto un po' diverso da quelle di altri. (Per esempio, nella *Statistical Review of World Energy* della BP, 1 kWh di elettricità viene convertito come pari a $100/38 \simeq 2.6$ kWh di petrolio; d'altra parte, il *Digest of UK Energy Statistics* del Governo usa il mio stesso fattore di conversione pari a uno.) E sottolineo ancora una volta, questa scelta non significa che sto suggerendo che sia possibile convertire qualsiasi forma di energia direttamente in un'altra. La conversione di energia chimica in elettricità comporta sempre uno spreco di energia, così come la conversione di elettricità in energia chimica.

Fisica ed equazioni

In tutto il libro, il mio obiettivo è non solo quello di ricavare numeri che indichino il consumo attuale di energia ed un'ipotesi di produzione soste-

nibile, ma anche quello di rendere chiaro *da che cosa questi numeri dipendano*. Capire da cosa i numeri dipendano è essenziale se vogliamo scegliere politiche sensate per modificare uno qualsiasi dei numeri. Solo se si comprende la fisica che sta dietro il consumo e la produzione di energia si possono valutare affermazioni come "le auto sprecano il 99% dell'energia che consumano, potremmo ridisegnare le auto in modo che utilizzino 100 volte meno energia". È vera questa affermazione? Per spiegare la risposta, ho bisogno di utilizzare equazioni come

$$\text{energia cinetica} = \frac{1}{2}mv^2.$$

Tuttavia, riconosco che per molti lettori, tali formule siano come una lingua straniera. Quindi, ecco la mia promessa: *terrò tutta questa roba in lingua straniera all'interno di capitoli tecnici, alla fine del libro*. Ogni lettore con un titolo di studio di scuola superiore/secondaria in matematica, fisica, o chimica dovrebbe godersi questi capitoli tecnici. Il filo conduttore del libro (da p. 2 a p. 278) è destinato ad essere accessibile a tutti coloro che sono in grado di sommare, moltiplicare e dividere. In particolare, è rivolto ai nostri cari rappresentanti eletti e non eletti, ossia i membri del Parlamento.

Un ultimo punto, prima di andare a regime: non so tutto sull'energia. Non ho tutte le risposte, ed i numeri che offro sono aperti a revisioni e correzioni. (In effetti mi aspetto delle correzioni e le pubblicherò sul sito internet del libro.) L'unica cosa di cui *sono* certo è che le risposte alle nostre domande sull'energia sostenibile comporteranno dei *numeri* e che qualsiasi sano dibattito sull'energia sostenibile richiede numeri. Questo libro li ha e mostra come gestirli. Spero che vi piaccia!

Note ed approfondimenti

p.

30 *Il termine "al secondo" è già contenuto nella definizione di chilowatt.* Altri esempi di unità che, come il watt, hanno già insito un "tempo", sono: il nodo – "il nostro yacht procedeva ad una velocità di dieci nodi!" (un nodo è un miglio nautico *per* ora); l'hertz – "sentivo un ronzio a 50 hertz." (un hertz è una frequenza di un ciclo *al* secondo); l'ampere – "il fusibile si brucia quando la corrente è superiore a 13 ampere." (*non* 13 ampere al secondo); e il cavallo-motore – "quel motore puzzolente eroga 50 cavalli di potenza." (*non* 50 cavalli al secondo, né 50 cavalli all'ora, né 50 cavalli al giorno, semplicemente 50 cavalli).

– *Per favore non dite mai, in nessun caso, "un chilowatt al secondo".* Esistono specifiche, rare eccezioni a questa regola. Se parlando di una crescita della domanda di potenza, possiamo dire: "la richiesta dei Britannici sta aumentando di un gigawatt per anno"; d'altra parte nel Capitolo 26, laddove discuto delle fluttuazioni nella potenza eolica, dirò: "una mattina, la potenza erogata dalle pale eoliche irlandesi è scesa ad una velocità di 84 MW all'ora". Per cortesia prestate attenzione! Giusto una sillaba di troppo può indurre alla confusione: ad esempio, la lettura del vostro contatore elettrico è in chilowattora (kWh) e *non* in 'chilowatt-per-ora'.

A pagina 411 ho messo a disposizione una tavola di conversione che può esservi di aiuto per passare dai kWh al giorno per persona alle altre unità di misura principali in cui la potenza viene discussa.

3 *Automobili*

Figura 3.1. Auto. Una BMW rossa sminuita da un'astronave proveniente dal pianeta Dorkon.

Per il nostro primo capitolo sui consumi studieremo l'icona della civiltà moderna: l'automobile con dentro una persona da sola.

Quali sono i costi energetici per un utente-automobilista con consumi regolari? Una volta che conosciamo i tassi di conversione, è questione di semplice aritmetica:

$$\begin{array}{c}\text{energia usata}\\ \text{al giorno}\end{array} = \frac{\text{distanza percorsa al giorno}}{\text{distanza per unità di carburante}} \times \begin{array}{c}\text{energia per unità}\\ \text{di carburante.}\end{array}$$

Come **distanza percorsa al giorno** consideriamo 50 km (30 miglia).

Per quanto concerne la **distanza per unità di carburante**, nota anche come **economia** della vettura, prendiamo (dalla pubblicità di un'auto familiare) un valore pari a 33 miglia per gallone imperiale:

$$33\,\text{miglia per gallone imperiale} \simeq 12\,\text{km al litro.}$$

(Il simbolo "$\simeq$" significa "è all'incirca uguale a".)

Che dire dell'**energia per unità di carburante** (chiamata anche **potere calorifico** o **densità di energia**)? Anziché sforzarsi nella ricerca sui testi di fisica o quant'altro, è divertente valutare questo tipo di quantità facendo ricorso al pensiero laterale. I carburanti per automobili (siano essi diesel o benzina) sono tutti idrocarburi e gli idrocarburi si possono trovare anche sul nostro tavolo della colazione, con il potere calorifico comodamente scritto su di un lato della confezione: all'incirca 8 kWh per kg (figura 3.2). Dal momento che abbiamo stimato l'economia della vettura in miglia per unità di *volume* di combustibile, dobbiamo esprimere il potere calorifico come energia per unità di *volume*. Per convertire gli "8 kWh per kg" del nostro combustibile (un'energia per unità di *massa*) in un energia per unità di volume, abbiamo bisogno di conoscere la densità del carburante. Qual è la densità del burro? Beh, il burro galleggia a filo dell'acqua, proprio come le perdite di carburante nelle pozzanghere; quindi, la sua densità deve essere un po' meno di quella dell'acqua, che è di 1 kg per litro. Se si immagina una densità di 0.8 kg per litro, si ottiene un potere calorifico pari a:

$$8\,\text{kWh per kg} \times 0.8\,\text{kg per litro} \simeq 7\,\text{kWh per litro.}$$

Figura 3.2. Volete conoscere l'energia contenuta nel carburante delle auto? Guardate l'etichetta di una confezione di burro o margarina. Il potere calorifico è di 3000 kJ per 100 g, ossia circa 8 kWh per kg.

Piuttosto che perpetuare con ostinazione una stima imprecisa, passiamo ora al valore effettivo, che per la benzina è di di 10 kWh al litro.

$$\begin{array}{c}\text{energia usata}\\ \text{al giorno}\end{array} = \frac{\text{distanza percorsa al giorno}}{\text{distanza per unità di carburante}} \times \begin{array}{c}\text{energia per unità}\\ \text{di carburante}\end{array}$$
$$= \frac{50\,\text{km/giorno}}{12\,\text{km/litro}} \times 10\,\text{kWh/litro}$$
$$\simeq 40\,\text{kWh/giorno}.$$

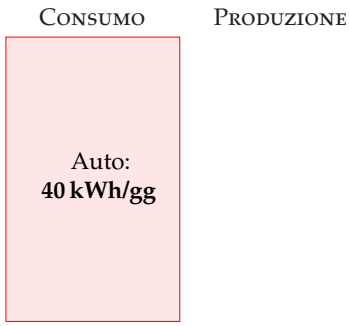


Figura 3.3. Conclusione del Capitolo 3: un tipico automobilista utilizza circa 40 kWh al giorno.

Congratulazioni! Abbiamo fatto la nostra prima stima dei consumi. Ho visualizzato questa stima nella pila di sinistra in figura 3.3. L'altezza del rettangolo rosso rappresenta 40 kWh al giorno per persona.

Questa è la stima per un tipico automobilista alla guida di un'auto media dei giorni nostri. Nei capitoli successivi si discuterà il consumo *medio* di tutte le persone in Gran Bretagna, tenendo conto del fatto che non tutti guidano. Ci sarà anche da discutere nella Parte II su quale consumo si *potrebbe* avere con l'aiuto di altre tecnologie, vale a dire le auto elettriche.

Perché un'auto fa 12 chilometri con un litro? Dove se ne va l'energia? Possiamo costruire automobili che fanno 1200 chilometri con un litro? Se siamo interessati a cercare di ridurre i consumi delle auto, abbiamo bisogno di capire la fisica che sta dietro i consumi di una vettura. Queste domande trovano risposta nel Capitolo A, di approfondimento tecnico (p. 282), che fornisce un modello schematico per stimare i consumi delle vetture. Vi incoraggio a leggere i capitoli tecnici, sempre che formule come $\frac{1}{2}mv^2$ non vi provochino problemi di salute.

Conclusione del Capitolo 3: un tipico automobilista utilizza circa 40 kWh al giorno. Il prossimo passo consiste nell'ottenere un valore della produzione sostenibile da impilare nell'apposito blocco, in modo che si abbia qualcosa da confrontare con la stima dei consumi appena fatta.

Domande

Che dire dei costi energetici della* produzione *del carburante per l'autovettura?

Ottimo punto. Quando faccio una stima dell'energia consumata da una particolare attività, tendo a scegliere "confini" piuttosto stretti, intorno ad essa. Questa scelta rende la stima più facile, ma sono d'accordo che sia una buona idea cercare di valutare l'intero impatto energetico dell'attività. È stato stimato che per ottenere ogni unità di benzina sono richieste in ingresso di 1.4 unità di petrolio ed altri combustibili primari (Treloar et al., 2004).

Ed il costo energetico della fabbricazione dell'*autovettura*?

Sì, anche questo costo è caduto al di fuori dei confini del presente calcolo. Parleremo di produzione di automobili nel Capitolo 15.

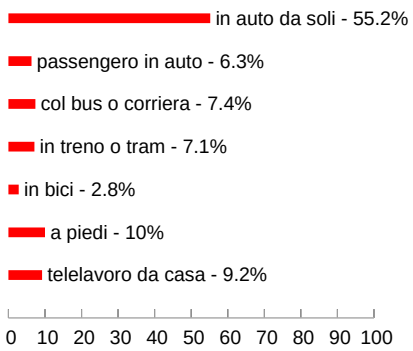


Figura 3.4. Come si recano al lavoro i Britannici, secondo il censimento del 2001.

Note ed approfondimenti

p.

34 *Come distanza percorsa al giorno consideriamo 50 km.* Ciò corrisponde a 18 000 km (11 000 miglia) all'anno. Quasi la metà della popolazione britannica va in auto al lavoro. La quantità totale di spostamenti in automobile nel Regno Unito è di 686 miliardi di passeggeri-km all'anno, il che corrisponde ad una

"distanza media percorsa in auto da ciascun Britannico" di circa 30 km al giorno. Fonte: Dipartimento dei Trasporti [5647rh]. Come ho detto a pagina 26, miro a stimare il consumo di una "tipica persona moderatamente benestante" – consumo al quale molte persone aspirano. Alcune persone non guidano molto. In questo capitolo, voglio fare una stima dell'energia consumata da qualcuno che guida per scelta, piuttosto che depersonalizzare la risposta riportando la media del Regno Unito, che mescola insieme guidatori e non-guidatori. Se dicessi che "l'utilizzo medio di energia per la guida di veicoli nel Regno Unito è di 13 kWh/gg a persona", scommetto che qualcuno fraintenderebbe e direbbe: "io sono un automobilista, per cui, immagino, consumo 13 kWh/gg".

34 *... prendiamo un valore pari a 33 miglia per gallone imperiale.* Nella lingua europea, questo diventa 8.6 litri per 100 km. 33 miglia per gallone era la media per le autovetture del Regno Unito nel 2005 [27jdc5]. Le auto a benzina in media hanno un consumo di carburante di 10.97 km/l, quelle diesel 13.81 km/l, quelle a benzina nuove (meno di due anni) 11.33 km/l (Dept. for Transport, 2007). Honda, "la casa automobilistica più efficiente d'America", dichiara che la sua flotta di nuove auto vendute nel 2005 ha registrato una media di primo livello con un consumo di carburante di 12.39 km per litro. [28abpm].

– *Se si immagina una densità di 0.8 kg per litro.* La densità della benzina è di 0.737, quella del gasolio 0.820–0.950 [nmn4l].

– *... il valore effettivo 10 kWh per litro.* ORNL [2hcgdh] fornisce i seguenti poteri calorifici: diesel: 10.7 kWh/l; propellente per jet: 10.4 kWh/l; benzina: 9.7 kWh/l. Quando si cerca il potere calorifico, si trovano elencati "potere calorifico lordo" e "potere calorifico netto" (noti anche come "potere calorifico superiore" e "potere calorifico inferiore"). Questi differiscono solo del 6% nei carburanti per motori; dunque, non è fondamentale distinguerli qui, ma lasciatemi spiegare comunque. Il potere calorifico lordo è l'energia chimica effettiva, rilasciata quando il carburante viene bruciato. Uno dei prodotti della combustione è l'acqua e nella maggior parte dei motori e delle centrali termoelettriche una porzione dell'energia finisce nella vaporizzazione di tale acqua. Il potere calorifico netto misura la quantità di energia che resta, assumendo che questa energia di vaporizzazione venga scartata e sprecata.
Quando ci chiediamo: "quanta energia consuma il mio stile di vita?", il potere calorifico lordo è la quantità giusta da usare. Il potere calorifico netto, viceversa, interessa ad un ingegnere che lavora in una centrale elettrica e che deve decidere quale combustibile bruciare nel suo impianto. In questo libro, cercheremo di fare riferimento ai poteri calorifici lordi.
Una nota finale per gli immancabili guastafeste, i pedanti che dicono: "il burro non è un idrocarburo". OK, il burro non è un idrocarburo *puro*, ma è una buona approssimazione dire che la componente principale del burro è una lunga catena di idrocarburi, proprio come per la benzina. La prova del nove è che questa approssimazione ci ha portato ad un risultato che si pone entro il 30% della risposta correttta. Benvenuti nella "guèrrilla" della fisica.

potere calorifico	
benzina	10 kWh per litro
diesel	11 kWh per litro

4 Eolico

Il Regno Unito possiede le migliori risorse eoliche in Europa.

Sustainable Development Commission

I parchi eolici devasteranno inutilmente la campagna.

James Lovelock

Quanta energia eolica possiamo verosimilmente generare?

Siamo in grado di fare una stima del potenziale dell'eolico *on-shore*, ovvero su terraferma, nel Regno Unito, moltiplicando la potenza media per unità di superficie terrestre di un parco eolico per la superficie a persona del Regno Unito:

potenza per persona = potenza eolica per unità di area $\times$ area per persona.

Il Capitolo B (p. 293) spiega come fare una stima della potenza per unità

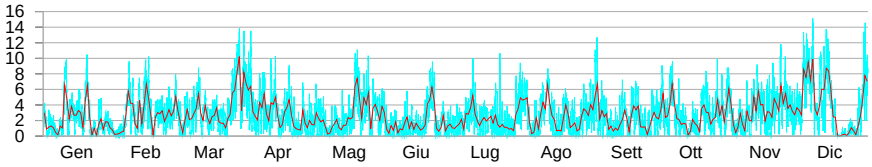


Figura 4.1. Velocità media del vento a Cambridge, in metri al secondo, su base giornaliera (linea rossa), ed ogni mezz'ora (linea blu), nel corso del 2006. Si veda anche figura 4.6.

di area di un parco eolico nel Regno Unito. Se la velocità tipica del vento è di 6 m/s (13 miglia all'ora, ossia 22 km/h), la potenza per unità di area di un parco eolico è di circa 2 W/m^2.

Questa cifra di 6 m/s è probabilmente una sovrastima per molte località in Gran Bretagna. Ad esempio, la figura 4.1 mostra le velocità medie giornaliere del vento a Cambridge nel 2006. La velocità media giornaliera ha raggiunto la velocità di 6 m/s solo per circa 30 giorni dell'anno – si veda la figura 4.6 per un istogramma. In altre zone si possono avere velocità del vento superiori a 6 m/s – per esempio, sulla vetta del Cairngorm in Scozia (figura 4.2). Inserendo la densità della popolazione britannica che è di 250

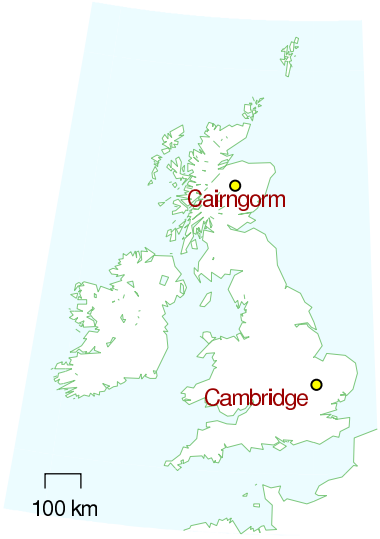
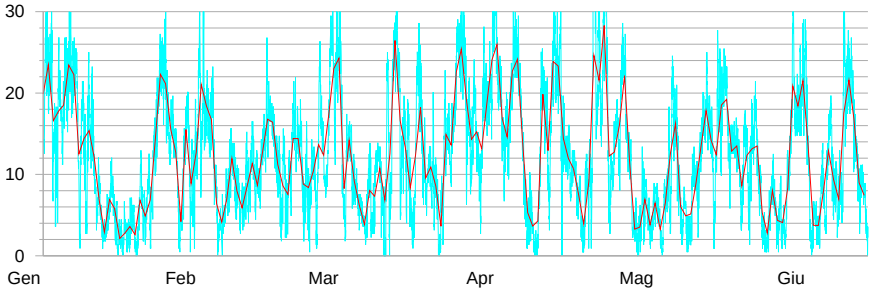


Figura 4.2. Velocità media del vento a Cairngorm, in metri al secondo, durante i primi sei mesi del 2006.



persone per chilometro quadrato, ossia 4000 metri quadrati per persona, si trova che la potenza eolica potrebbe generare

$$2\,\mathrm{W/m^2} \times 4000\,\mathrm{m^2/persona} \;=\; 8000\,\mathrm{W\ per\ persona},$$

nel caso in cui le turbine eoliche fossero stipate lungo *tutto* il Paese, ed assumendo che $2\,\mathrm{W/m^2}$ sia la potenza per unità di area corretta. Convertendo nelle nostre unità di potenza preferite, si ha 200 kWh/gg per persona.

Cerchiamo di essere realisti. Quale frazione del Paese possiamo davvero immaginare di coprire con le pale eoliche? Forse il 10%? Fatta questa ipotesi, possiamo concludere che se ricoprissimo il 10% più ventoso del Paese con pale eoliche (eroganti $2\,\mathrm{W/m^2}$), saremmo in grado di generare 20 kWh/gg per persona, che è ***metà*** della potenza usata guidando un'auto media a combustibili fossili per 50 km al giorno.

Per la Gran Bretagna la risorsa di energia eolica su terraferma può essere "enorme", ma evidentemente non è così enorme quanto il nostro enorme consumo. Tratteremo il caso delle pale eoliche in mare aperto più tardi. Vorrei attirare l'attenzione su quanto sia generosa l'ipotesi che ho assunto. Mettiamo a confronto la stima del potenziale eolico britannico con l'attuale potenza eolica installata in tutto il mondo. Le pale eoliche che sarebbero necessarie per fornire al Regno Unito 20 kWh/gg per persona ammonterebbero a 50 volte gli apparati installati in Danimarca, 7 volte tutti i parchi eolici della Germania ed il doppio della "flotta" composta oggi come oggi da tutte le turbine eoliche del mondo. Vi prego di non fraintendermi. Sto affermando che non dovremmo preoccuparci della costruzione di parchi eolici? Niente affatto. Sto semplicemente cercando di trasmettere un dato di fatto utile, vale a dire che, se vogliamo l'energia eolica per fare veramente la differenza, allora i parchi eolici devono coprire un'area molto vasta.

La conclusione che il contributo massimo del vento su terraferma, anche se "enorme", è molto inferiore al nostro consumo è importante; quindi, cerchiamo di dare una controllata al valore chiave, la potenza ipotizzata per unità di superficie di un parco eolico teorico ($2\,\mathrm{W/m^2}$), mettendola a confronto con quella di un vero e proprio parco eolico nel Regno Unito.

Il parco eolico di Whitelee, in costruzione nei pressi di Glasgow, in Scozia, dispone di 140 turbine con una potenza totale di *picco* di 322 MW su di una superficie di $55\,\mathrm{km^2}$. Ecco che si hanno, quindi, $6\,\mathrm{W/m^2}$, di *picco*. La potenza media prodotta è, invece, minore, perché le turbine non funzionano a potenza massima per tutto il tempo. Il rapporto tra la potenza media e la potenza di picco è chiamato "fattore di carico", o "fattore di capacità", e varia da luogo a luogo e con la scelta del posizionamento delle torri; un fattore tipico per un buon sito con turbine moderne è del 30%. Se assumiamo che Whitelee ha un fattore di carico del 33% allora la produzione di potenza media per unità di superficie terrestre è $2\,\mathrm{W/m^2}$ – esattamente come la densità di potenza che abbiamo ipotizzato sopra.

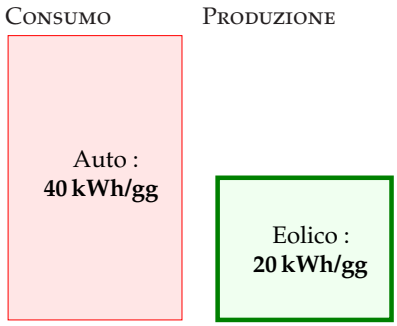


Figura 4.3. Conclusione del Capitolo 4: la produzione massima verosimile da pale eoliche on-shore nel Regno Unito è di 20 kWh al giorno per persona.

Potenza per unità di area	
parco eolico (velocità 6 m/s)	$2\,\mathrm{W/m^2}$

Tabella 4.4. Fatti che vale la pena ricordare: parchi eolici.

densità della popolazione britannica
250 per $\mathrm{km^2} \leftrightarrow 4000\,\mathrm{m^2}$ per persona

Tabella 4.5. Fatti che vale la pena ricordare: densità della popolazione. Si veda pagina 379 per ulteriori dati sulle densità di popolazione.

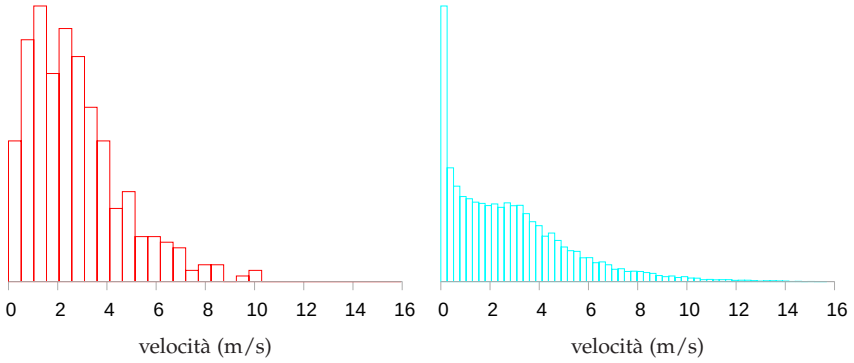


Figura 4.6. Istogramma delle velocità medie del vento di Cambridge in metri al secondo: medie giornaliere (a sinistra) ed ogni mezzora (a destra).

Domande

Le turbine eoliche continuano a diventare sempre più grandi. Turbine eoliche più grandi cambierebbero le conclusioni di questo capitolo?

Il Capitolo B lo spiega. Le grandi turbine eoliche realizzano economie di scala di carattere finanziario, ma non aumentano notevolmente la potenza totale per unità di superficie terrestre, poiché pale più grandi devono essere disposte più distanti tra loro. Un parco eolico con torri due volte più alte fornirà all'incirca il 30% di potenza in più.

La potenza eolica fluttua in continuazione. Sicuramente questo fatto rende il vento meno utile, o no?

Forse. Torneremo su questo punto nel Capitolo 26, dove vedremo l'intermittenza del vento e discuteremo di diverse soluzioni possibili a questo problema, compreso lo stoccaggio di energia e la gestione della domanda.

Note ed approfondimenti

p.

37 *Figura 4.1 e figura 4.6*. I dati sul vento di Cambridge provengono dal Digital Technology Group, Computer Laboratory, Cambridge [`vxhhj`]. La stazione meteorologica è sul tetto dell'edificio Gates, a circa 10 m di altezza. La velocità del vento ad un'altezza di 50 m è in genere maggiore del 25%, circa. I dati su Cairngorm (*figura 4.2*) provengono dal Dipartimento di Fisica dell'Università Heriot-Watt [`tdvml`].

38 *Le pale eoliche necessarie per fornire al Regno Unito 20 kWh/gg per persona sono pari a 50 volte l'intera potenza eolica installata in Danimarca*. Assumendo un fattore di carico del 33%, una potenza media di 20 kWh/gg per persona richiede una capacità installata di 150 GW. Alla fine del 2006, la Danimarca aveva una capacità installata di 3.1 GW; la Germania di 20.6 GW e il totale su base mondiale era di 74 GW (`wwindea.org`). Per inciso, sempre nel 2006, il fattore di carico dell'intera "flotta eolica" danese era del 22% e la potenza media fornita era di 3 kWh/gg a persona.

5 Aerei

Immaginate di fare un viaggio intercontinentale in aereo all'anno. Quanta energia costa?

Un Boeing 747-400 con 240 000 litri di carburante trasporta 416 passeggeri per circa 8 800 miglia (14 200 km), e il potere calorifico del carburante è di 10 kWh per litro (lo abbiamo imparato nel Capitolo 3). Di conseguenza, il costo energetico complessivo sull'intera distanza andata-ritorno percorsa su di un aereo del genere, se diviso equamente tra i passeggeri, è

$$\frac{2 \times 240\,000\,\text{litri}}{416\,\text{passeggeri}} \times 10\,\text{kWh/litro} \simeq 12\,000\,\text{kWh per passeggero.}$$

Se si effettua un viaggio del genere all'anno, allora il consumo energetico medio al giorno è

$$\frac{12\,000\,\text{kWh}}{365\,\text{giorni}} \simeq 33\,\text{kWh/giorno.}$$

14 200 km è un po' più della distanza tra Londra e Città del Capo (10 000 km) e tra Londra e Los Angeles (9000 km), quindi penso che abbiamo un po' sopravvalutato la distanza di un tipico viaggio intercontinentale a lungo raggio.

D'altra parte abbiamo anche sovrastimato il livello di riempimento dell'aereo e il costo energetico per persona è maggiore nel caso in cui l'aereo non sia pieno. Ridimensionando con 10 000 km/14 200 km, in modo da ottenere una stima per Città del Capo, e di seguito con 100/80, in modo da consentire all'aereo di essere giusto all'80% dell'occupazione, si arriva a 29 kWh per giorno. Per facilitarne la memorizzazione, arrotondiamo la cifra a 30 kWh al giorno.

Facciamo in modo che sia chiaro il significato di quanto appena esposto. Volare una volta all'anno ha un costo energetico leggermente più alto di lasciare un fornello elettrico da 1 kW acceso, non-stop, 24 ore al giorno, tutto l'anno.

Il Capitolo 3, in cui abbiamo stimato il consumo delle auto, era accompagnato dal Capitolo A, che offre un modello di come l'energia "va in auto". Analogamente, la controparte tecnica di questo capitolo (Capitolo C, p. 300) discute di come l'energia "va in aereo". Il Capitolo C ci permette di rispondere a domande come: "i viaggi aerei consumerebbero significativamente meno energia se viaggiassimo su aeroplani più lenti?". La risposta è **no**: a differenza dei veicoli su ruote, che *possono* divenire tanto più efficienti quanto più viaggiano lentamente, gli aeroplani hanno già un'efficienza energetica così alta da essere su per giù arrivati al limite teorico. Gli aerei debbono inevitabilmente utilizzare l'energia per due motivi: per spingere l'aria verso il basso al fine di rimanere su, e per vincere la resistenza dell'aria. Nessuna riprogettazione di un aeroplano migliorerà radicalmente la

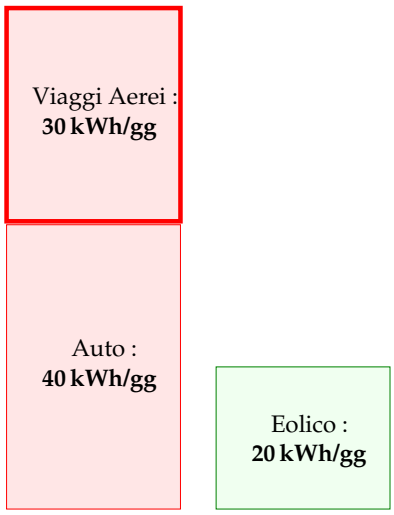


Figura 5.1. Facendo un viaggio intercontinentale all'anno si consumano circa 30 kWh al giorno.

sua efficienza. Un miglioramento del 10%? Si, è possibile. Un raddoppio dell'efficienza? Mi ciuccerei i calzini della domenica.

Figura 5.2. Bombardier Q400 NextGen. www.q400.com.

Domande

I velivoli a turboelica sono* di gran lunga *più efficienti energeticamente?

No. Il "confortevolmente verde" Bombardier Q400 NextGen, "il turboelica tecnologicamente più avanzato al mondo", secondo il suo fabbricante [www.q400.com], consuma 3.81 litri per 100 passeggeri-km (ad una velocità di crociera di 667 km/h), che equivale ad un costo energetico di 38 kWh per 100 p-km. Il 747 al completo ha un costo energetico di 42 kWh per 100 p-km. Quindi, entrambi gli aeroplani sono due volte più efficienti nel consumo di carburante rispetto ad un'auto occupata da un singolo utilizzatore (l'auto che sto dando per scontata é la vettura media europea di cui abbiamo parlato nel Capitolo 3).

	energia per distanza (kWh per 100 p-km)
Automobile (4 occupanti)	20
Aeroplani della Ryanair, anno 2007	37
Bombardier Q400, a pieno carico	38
747, al completo	42
747, 80% pieno	53
Aeroplani della Ryanair, anno 2000	73
Automobile (1 occupante)	80

Tabella 5.3. Efficienze nel trasporto di passeggeri, espresse in termini di energia richiesta per 100 passeggero-km.

Volare è, in qualche modo, super-negativo per il cambiamento climatico?

Sì, questo è il parere degli esperti, sebbene rimanga dell'incertezza su questo argomento [3fbufz]. Volare crea altri gas serra oltre alla CO_2, come vapore acqueo e ozono, nonché gas serra indiretti, come gli ossidi di azoto. Se si volesse valutare la propria impronta di carbonio in tonnellate di CO_2-equivalente, allora si dovrebbero prendere le emissioni effettive di CO_2 dei propri voli e moltiplicarle per un fattore due o tre. I diagrammi di questo libro non comprendono tale moltiplicatore, perché qui ci stiamo concentrando sul nostro bilancio *energetico*.

> *La cosa migliore che possiamo fare con gli ambientalisti è spararagli*
>
> Michael O'Leary, CEO di Ryanair [3asmgy]

Note ed approfondimenti

p.

40 *Boeing 747-400* – i dati provengono da [9ehws]. Al giorno d'oggi gli aeroplani non viaggiano al completo. Le compagnie aeree sono orgogliose quando il loro carico medio è dell'80%. Gli aerei della Easyjet sono carichi in media all'85%. (Fonte: thelondonpaper martedì 16 gennaio 2007). Un 747 pieno all'80% utilizza ciarca 53 kWh per 100 passeggero-km.
Che dire dei voli a corto raggio? Nel 2007, Ryanair, "la compagnia aerea più verde d'Europa", forniva trasporti ad un costo di 37 kWh per 100 p-km [3exmgv]. Questo significa che volare in Europa con Ryanair ha più o meno lo stesso costo energetico che far arrivare tutti i passeggeri a destinazione in auto, due per macchina. (Per avere un'indicazione di ciò che altre compagnie aeree potrebbero fornire, il tasso di combustione del carburante di Ryanair nel 2000, prima dei loro investimenti rispettosi dell'ambiente, superava i 73 kWh per 100 p-km). Da Londra a Roma sono 1430 km; da Londra

Figura 5.4. Boeing 737-800 della Ryanair. Fotografia di Adrian Pingstone.

a Malaga 1735 km. Quindi, tra andata e ritorno a Roma con la compagnia aerea più verde si ha un costo energetico di 1050 kWh, mentre un viaggio a Malaga costa 1270 kWh. Se si fa un salto a Roma e a Malaga una volta l'anno, si ha un consumo medio di 6.3 kWh/gg con la compagnia aerea più verde, e forse 12 kWh/gg con una meno verde.
Ma che dire dei viaggiatori abituali? A quanto pare, per ottenere una carta d'argento per i viaggiatori frequenti di una compagnia aerea intercontinentale, si deve volare circa 25 000 miglia all'anno in classe economica. Il che significa circa 60 kWh al giorno, se aumentiamo in proporzione i numeri in apertura di questo capitolo ed assumiamo che gli aerei siano occupati all'80%.
Qui ci sono alcune cifre aggiuntive presentate dal Pannello Intergovernativo sui Cambiamenti Climatici [sigla inglese: IPCC. (N.d.T.)] [`yrnmum`]: un 747-400 pieno che viaggia per 10 000 km con una bassa densità di occupazione dei posti a sedere (262 posti) ha un consumo energetico di 50 kWh per 100 p-km. In una configurazione ad elevata densità di occupazione (568 posti) e viaggiando per 4000 km, lo stesso aeroplano presenta un consumo di energia pari a 22 kWh per 100 p-km. Un Tupolev-154 a corto raggio che percorre 2235 km con il 70% dei suoi 164 posti occupati consuma 80 kWh per 100 p-km.

41 *Nessuna riprogettazione di un aeroplano comporterà un miglioramento radicale della sua efficienza* In realtà , il Consiglio Consultivo per la Ricerca Aerospaziale in Europa (ACARE) [acronimo inglese: Advisory Council for Aerospace Research in Europe. (N.d.T.)] ha come obiettivo una riduzione complessiva del 50% del carburante bruciato per passeggero-km entro il 2020 (prendendo come base di riferimento il 2000). Questo significa che è atteso un miglioramento del 15–20% del rendimento del motore. Nel 2006, Rolls Royce era a metà strada dal raggiungere tale obiettivo [`36w5gz`].
Dennis Bushnell, scienziato capo del Centro di Ricerca Langley della NASA, sembra essere d'accordo con la mia valutazione complessiva delle prospettive di miglioramento dell'efficienza nel settore dell'aviazione. L'industria aeronautica è matura. "Non c'è rimasto molto da guadagnare in migliorie, se non tramite una sorta di accrescimento glaciale, ottenendo solo qualche piccola percentuale qua e là sul lungo periodo." (New Scientist, 24 febbraio 2007, p. 33.)
Il "Silent Aircraft" [`silentaircraft.org/sax40`] è stato ridisegnato radicalmente; nel caso in cui fosse costruito, è previsto essere più efficiente del 16% di un aeroplano a forma tradizionale (Nickol, 2008).
Se l'obiettivo ACARE verrà raggiunto, è presumibile che lo sarà soprattutto grazie al fatto di avere aerei più pieni ed una migliore gestione del traffico aereo.

Figura 5.5. Due viaggi a corto raggio sulla compagnia più ecologica: 6.3 kWh/giorno. Volando abbastanza da qualificarsi per il livello di fidelizzazione argento: 60 kWh/giorno.

6 Solare

Stiamo valutando in che modo la pila formata dai nostri consumi si ponga di fronte ad un'ipotesi di produzione sostenibile. Negli ultimi tre capitoli abbiamo scoperto che guidare auto e volare in aereo supera il potenziale teorico immaginabile dell'eolico on-shore del Regno Unito. L'energia solare è in grado di portare la produzione di nuovo in testa?

La potenza nuda e cruda irraggiata dal Sole a mezzogiorno in una giornata senza nuvole è 1000 W per metro quadrato. Voglio dire 1000 W per m^2 di superficie orientata verso il Sole, non per m^2 di superficie terrestre. Al fine di ottenere la potenza per m^2 di *superficie terrestre* in Gran Bretagna, è d'uopo che si facciano svariate correzioni. Occorre compensare l'inclinazione tra il Sole e la Terra, che riduce l'intensità del Sole di mezzogiorno a circa il 60% del rispettivo valore all'equatore (figura 6.1). Si hanno poi ulteriori perdite, anche perché non è sempre mezzogiorno. In una giornata di marzo o settembre senza nuvole, il rapporto tra l'intensità *media* e l'intensità a mezzogiorno espresso in percentuale corrisponde grossomodo ad un 32%. In una località tipica del Regno Unito, il Sole splende durante appena il 34% delle ore di luce.

L'effetto combinato di questi tre fattori e la complicazione aggiuntiva inerente all'alternarsi delle stagioni è che la potenza media grezza del Sole per metro quadrato di tetto esposto a sud in Gran Bretagna è pari a circa 110 W/m^2, e la potenza media grezza del Sole per metro quadrato di terreno piano è di approssimativamente 100 W/m^2.

Possiamo trasformare questa potenza grezza in potenza utile in quattro modi

1. Solare termico: utilizzando la luce del Sole per il riscaldamento diretto di edifici o acqua.

2. Solare fotovoltaico: generando elettricità.

3. Solare da biomasse: utilizzando alberi, batteri, alghe, mais, semi di soia, olio di semi per ottenere combustibili energetici, prodotti chimici o materiali da costruzione.

4. Cibo: come per le biomasse, prendendo piante e prodotti vegetali a palate, con la differenza che li si usa per alimentare esseri umani od altri animali.

(In un capitolo successivo avremo anche modo di esaminare un paio di altre tecniche adeguate per l'uso dell'energia solare nei deserti.)

Facciamo delle stime veloci e grossolane delle potenze massime plausibili che ognuna di queste strade potrebbe fornirci. Trascureremo i costi economici, nonché quelli energetici di fabbricazione e mantenimento degli impianti di generazione.

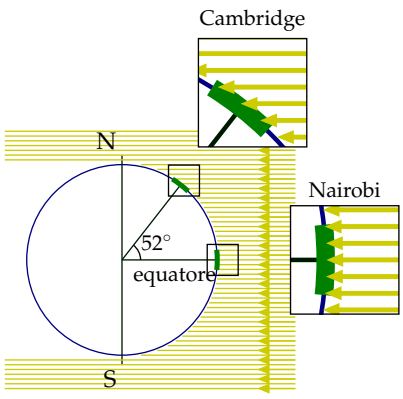


Figura 6.1. Luce del Sole che colpisce la Terra a mezzogiorno in un giorno di primavera o d'autunno. La densità della luce solare per unità di superficie a Cambridge (latitudine 52°) è circa il 60% di quella all'equatore.

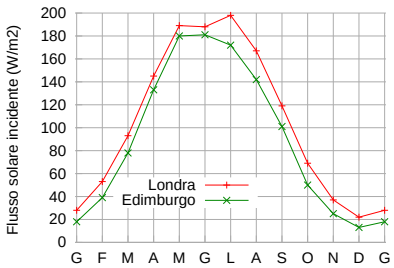


Figura 6.2. Intensità solare media a Londra ed Edimburgo in funzione del periodo dell'anno. L'intensità media, per unità di superficie, è di 100 W/m^2.

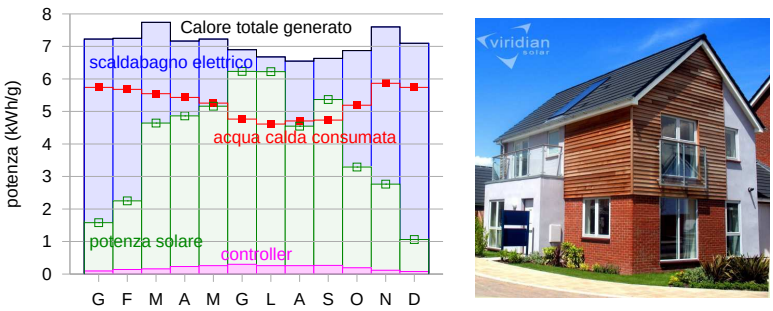


Figura 6.3. Potenza generata da un pannello solare termico di 3 m^2 della Viridian Solar (parte verde del grafico), e calore supplementare richiesto (parte blu) per scaldare l'acqua della casa usata per le prove di funzionamento. (La fotografia mostra una casa con lo stesso modello di pannello sul tetto.) La potenza media solare sui 3 m^2 è risultata pari a 3.8 kWh/gg. L'esperimento ha simulato il consumo di acqua calda di una famiglia media europea – 100 litri di acqua calda (60 °C) al giorno. Il divario di 1.5–2 kWh/gg tra la potenza termica totale generata (linea nera, in alto) e quella dell'acqua calda utilizzata (linea rossa) è causato dalla perdita di calore. La linea magenta mostra la potenza elettrica necessaria per far funzionare il sistema. La potenza media per unità di area di questi pannelli solari è 53 W/m^2.

Solare termico

La più semplice forma di tecnologia a potenza solare è un pannello per l'erogazione di acqua calda. Immaginiamo di coprire *tutti* i tetti rivolti a sud con pannelli solari termici – il che vorrebbe dire circa 10 m^2 di pannelli a persona – e supponiamo che questi abbiano un'efficienza del 50% nel trasformare i 110 W/m^2 della luce del Sole in acqua calda (figura 6.3). Dalla moltiplicazione

$$50\% \times 10\,\mathrm{m}^2 \times 110\,\mathrm{W/m}^2$$

ricaviamo che il riscaldamento solare potrebbe fornirci

13 kWh al giorno per persona.

Coloro questa casella di bianco in figura 6.4 ad indicare che essa descrive la produzione di un'energia di bassa qualità – l'acqua calda non è così preziosa come l'energia elettrica, di alta qualità, che producono le turbine eoliche. Il calore non può essere trasferito alla rete elettrica. Se non ne hai bisogno, allora è sprecato. Dovremmo tenere bene a mente che gran parte di questo calore catturato potrebbe non trovarsi nel posto giusto. Nelle città, dove molte persone vivono, gli alloggi residenziali dispongono di una superficie del tetto per persona inferiore alla media nazionale. Inoltre, questa potenza non verrebbe fornita in modo continuo e costante durante l'anno.

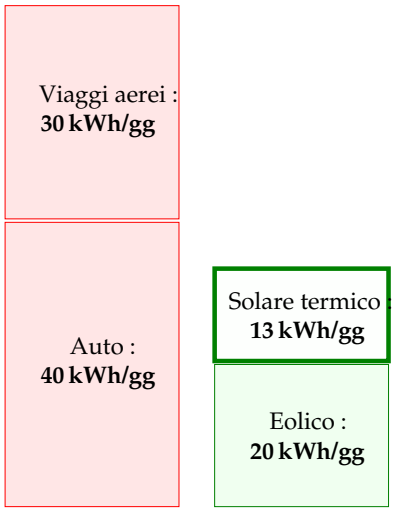


Figura 6.4. Solare termico: un dispiegamento di 10 m^2 di pannelli termici può fornire (in media) circa 13 kWh al giorno di energia termica.

Solare fotovoltaico

I pannelli fotovoltaici (FV) convertono la luce solare in elettricità. Tipicamente hanno un rendimento di circa il 10%; quelli costosi ne esibiscono uno del 20%. (Le fondamentali Leggi della Fisica limitano l'efficienza dei sistemi fotovoltaici: si ha un massimo pari al 60% se si usano lenti o specchi perfetti come concentratori, e al 45% senza concentrazione. Una produzione di massa di dispositivi con efficienze superiori al 30% sarebbe un fatto davvero degno di nota.) La potenza media erogata da pannelli fotovoltaici

rivolti a sud con efficienza del 20% in Gran Bretagna sarebbe

$$20\% \times 110\,\mathrm{W/m^2} = 22\,\mathrm{W/m^2}.$$

La Figura 6.5 mostra i dati che supportano questo numero. Diamo ad ogni persona $10\,\mathrm{m^2}$ di costosi (efficienti al 20%) pannelli solari e ricopriamo tutti i tetti esposti a sud. Questi ci forniranno

5 kWh al giorno per persona.

Dal momento che la superficie di tutti i tetti esposti a sud è di $10\,\mathrm{m^2}$ a persona, certamente non c'è spazio sui nostri tetti sia per questi pannelli fotovoltaici sia per i pannelli solari termici dell'ultima sezione. Pertanto, dobbiamo decidere se avere il contributo fotovoltaico per l'elettricità oppure quello solare termico per l'acqua calda; è una scelta inevitabile, ma io mi limiterò a "sbattere" entrambi i contributi nella pila della produzione. Per inciso, il costo attuale di installazione di tali pannelli fotovoltaici è pari a circa quattro volte quello dei pannelli solari termici; consegnano, però, solo la metà dell'energia, sebbene sia della migliore qualità (elettricità). Vorrei, quindi, consigliare ad una famiglia che stia pensando di passare al solare di studiare l'opzione del solare termico per prima. La soluzione più intelligente, almeno nei "Paesi del Sole", è quella di realizzare sistemi combinati, in grado di fornire energia elettrica e acqua calda da un unico impianto. Questo è l'approccio lanciato dai tecnici di Heliodynamics, i quali riducono il costo complessivo dei loro sistemi circondando piccoli impianti fotovoltaici di alta qualità ad arseniuro di gallio con schiere di

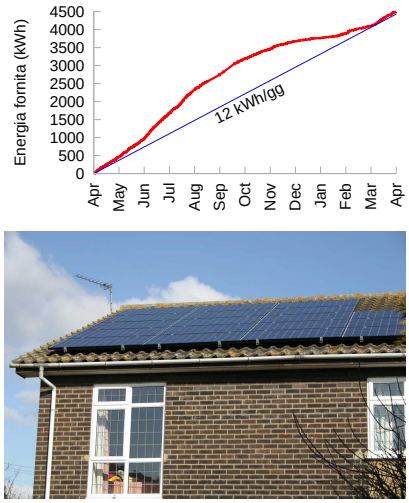


Figura 6.5. Solare fotovoltaico: dati provenienti da un dispiegamento di $25\,\mathrm{m^2}$ nel Cambridgeshire nel 2006. La potenza di picco erogata da tale schiera ammonta a circa 4 kW. Quella media, su tutto l'anno, è di 12 kWh al giorno. Il che significa 20 W per metro quadro di pannello.

Figura 6.6. Due guerrieri solari che si godono il loro impianto fotovoltaico, che alimenta le loro auto elettriche e la loro casa. Il dispiegamento di 120 pannelli (300 W e $2.2\,\mathrm{m^2}$ ciascuno) occupa un'area di $268\,\mathrm{m^2}$, ha una potenza di picco (perdite di conversione DC-AC permettendo) pari a 30.5 kW ed una produzione media – in California, vicino a Santa Cruz – di 5 kW ($19\,\mathrm{W/m^2}$). Foto gentilmente fornita da Kenneth Adelman. `www.solarwarrior.com`

specchi piani in grado di muoversi lentamente. Tali specchi concentrano la luce del Sole sulle unità fotovoltaiche, ed i dispositivi offrono sia elettricità che acqua calda; quest'ultima viene generata pompando acqua nel retro dei pannelli fotovoltaici. Traiamo da quanto sin qui esposto le nostre prime conclusioni: coprire la parte del vostro tetto di casa rivolta a sud con il fotovoltaico può fornire energia sufficiente a coprire un bel pezzo importante del vostro consumo medio personale di energia elettrica, ma i tetti non sono grandi abbastanza per intaccare seriamente il nostro consumo totale di *energia*. Per fare di più con il FV, dobbiamo scendere coi piedi per terra. I guerrieri solari in figura 6.6 mostrano la strada.

Fantasia al potere: fattorie solari

Se si verificasse un passo avanti nella tecnologia ed il costo del fotovoltaico scendesse abbastanza da poter distribuire i pannelli per tutta la campagna, quale sarebbe la produzione massima concepibile? Beh, se coprissimo il 5% del Regno Unito di pannelli con un'efficienza del 10%, avremmo

$$\begin{aligned} & 10\% \times 100\,\mathrm{W/m^2} \times 200\,\mathrm{m^2} \text{ a persona} \\ \approx \quad & 50\,\mathrm{kWh/giorno/persona}. \end{aligned}$$

Ho preso in considerazione solo pannelli con un'efficienza del 10%, tra le altre cose, perché immagino che i pannelli solari sarebbero prodotti in massa su grande scala solo se molto a buon mercato, e a diventare più economici per primi sono i pannelli a più bassa efficienza. La densità di potenza (potenza per unità di superficie) di tale parco solare sarebbe

$$10\% \times 100\,\mathrm{W/m^2} = 10\,\mathrm{W/m^2}.$$

Questa densità di potenza è due volte quella del Bavaria Solarpark (figura 6.7). Potrebbe questo diluvio di pannelli solari co-esistere con l'esercito di aerogeneratori che ci siamo immaginati nel Capitolo 4? Sì, senza alcun problema: le pale eoliche proiettano una piccola ombra, ed i pannelli solari, stando "al piano terra", hanno un effetto trascurabile sul vento. Quanto è audace questo piano? La capacità in termini di potenza solare richiesta per fornire questi 50 kWh al giorno ad ogni persona nel Regno Unito è più di 100 volte quella di tutto il fotovoltaico attualmente installato nel mondo [dati riferiti al 2008. (N.d.T.)]. Devo, quindi, includere questa "mega-centrale fotovoltaica" nella mia pila della produzione sostenibile? Sono indeciso. All'inizio di questo libro ho detto che volevo esplorare ciò che le Leggi della Fisica dicono sui limiti dell'energia sostenibile, senza farmi problemi di soldi. Per questo motivo certamente dovrei tirare dritto, industrializzare la campagna, e spingere la centrale FV nella pila. Allo stesso tempo, voglio aiutare le persone a farsi un'idea di cosa dovremmo fare da *qui* al 2050.

Oggi come oggi, l'elettricità prodotta da impianti solari sarebbe quattro volte più costosa dell'attuale prezzo di riferimento del mercato. Pertanto,

Figura 6.7. Un parco fotovoltaico: il Solarpark a Mühlhausen, Baviera, da 6.3 MW (di picco). La sua potenza media per unità di superficie terrestre dovrebbe essere di circa $5\,\mathrm{W/m^2}$. Foto della SunPower.

mi sento un po' irresponsabile nell'inserire questa stima nella pila della produzione sostenibile in figura 6.9 – pavimentare il 5% del Regno Unito con pannelli solari appare al di là dei limiti del plausibile in tanti modi. Se seriamente si contemplasse l'idea di fare una cosa del genere, molto probabilmente si rivelerebbe una scelta migliore mettere i pannelli in un Paese due volte più soleggiato e spedire a casa via elettrodotto un po' di energia.

Torneremo su questa idea nel Capitolo 25.

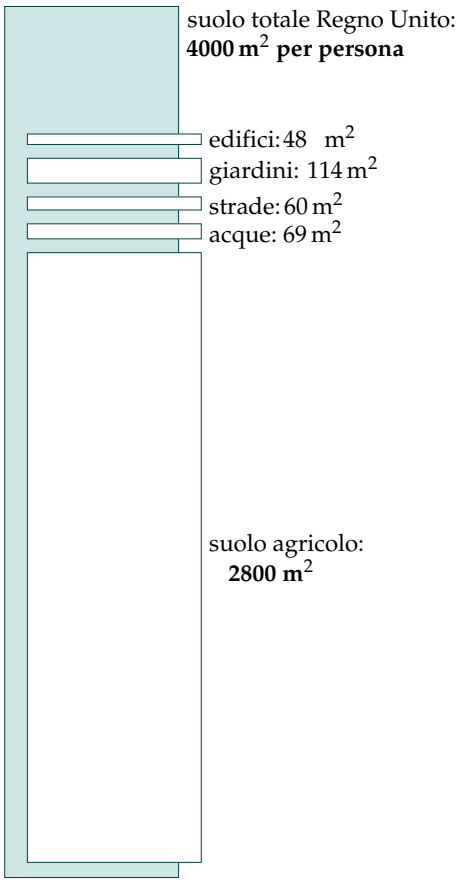


Figura 6.8. Superficie di terra per persona in Gran Bretagna.

False credenze

Fabbricando un pannello solare si consuma più energia di quanta ne potrà mai produrre

Falso. La *resa energetica* (il rapporto tra l'energia fornita da un sistema nell'arco della sua vita e l'energia necessaria per costruirlo) di un sistema ad energia solare, montato su di un tetto e connesso alla rete nel Centro-Nord Europa è 4, per un sistema con una durata di 20 anni (Richards and Watt, 2007); mentre è maggiore di 7 in un posto più assolato come l'Australia. (Una resa energetica maggiore di uno significa che il sistema è una "Buona Cosa" – vale a dire, una scelta saggia dal punto di vista energetico.) Le turbine eoliche con una vita utile di 20 anni hanno una resa energetica pari a 80.

Con il migliorare della tecnologia, i pannelli fotovoltaici non diverranno sempre più efficienti ?

Sono sicuro che i pannelli fotovoltaici diventeranno sempre più *economici*; sono anche sicuro che la *produzione* dei pannelli solari diverrà sempre meno ad alta intensità energetica, quindi la loro resa energetica migliorerà. Ma le stime del fotovoltaico di questo capitolo non erano forzate dai costi economici dei pannelli, né dal costo energetico della loro fabbricazione. In questo capitolo ci si è occupati della massima potenza concepibile in termini di produzione. I pannelli fotovoltaici con il 20% sono già vicino al limite teorico (vedi note di chiusura di questo capitolo). Rimarrei davvero sorpreso se un giorno le stime di questo capitolo concernenti le installazioni fotovoltaiche sui tetti dovessero subire una revisione significativa al rialzo.

Solare da biomasse

> *Tutto d'un tratto, vedete, potremmo ritrovarci nel business dell'energia semplicemente perché facciamo crescere l'erba nel nostro ranch! Basterà tagliarla e convertirla in energia. Questo è ciò che sta per accadere.*
>
> George W. Bush, Febbraio 2006

Tutte le soluzioni disponibili di tipo bioenergetico coinvolgono in primo luogo il far crescere della verzura, ed in secondo luogo il fare qualcosa con la verzura. A quanto può ammontare l'energia immagazzinata da questa roba verde? Esistono quattro vie principali per ottenere energia dai sistemi biologici alimentati da potenza solare:

1. Possiamo coltivare piante scelte appositamente e bruciarle in una centrale termica che produce energia elettrica o calore oppure entrambi. Chiameremo questa soluzione "sostituzione del carbone".

2. Possiamo far crescere certi tipi di piante (ad esempio colza, canna da zucchero o mais), trasformarle di seguito in etanolo o biodiesel, e "cacciare", quindi, il tutto in auto, treni, aerei o altri posti, dove tali sostanze sono utili. Oppure potremmo coltivare batteri, cianobatteri, o alghe, modificati tramite ingegneria genetica , in modo che producano direttamente idrogeno, etanolo, butanolo o persino energia elettrica. Chiameremo tutti questi approcci "sostituzione del petrolio".

3. Possiamo prendere i sottoprodotti di altre attività agricole e bruciarli in una centrale elettrica. I sottoprodotti potrebbero essere di vari tipi, dalla paglia (un sottoprodotto delle Weetabix) agli escrementi di gallina (un sottoprodotto dei McNuggets) [gallette di cereali e bocconcini di pollo, rispettivamente. (N.d.T.)]. Bruciare sottoprodotti è di nuovo una sostituzione del carbone, ma con piante normali, non quelle migliori, ad alta energia. Una centrale elettrica che brucia sottoprodotti agricoli non fornirà più potenza per unità di superficie di terreno agricolo di quanto faccia un impianto basato su di una coltivazione ottimizzata della biomassa, ma ha il vantaggio di non monopolizzare il terreno solo per questo scopo. Bruciare gas metano proveniente dalle discariche è un modo simile di ottenere energia, ma è sostenibile solo fino a quando si ha una fonte sostenibile di spazzatura da continuare a mettere nelle discariche. (La maggior parte del metano delle discariche viene dal cibo sprecato; la gente in Gran Bretagna butta via circa 300 g di alimenti al giorno per persona.) L'incenerimento dei rifiuti domestici è un altro modo, leggermente meno tortuoso, di ottenere energia dalla biomassa solare.

4. Possiamo coltivare le piante e darle da mangiare direttamente agli esseri umani e ad altri animali che necessitano di energia.

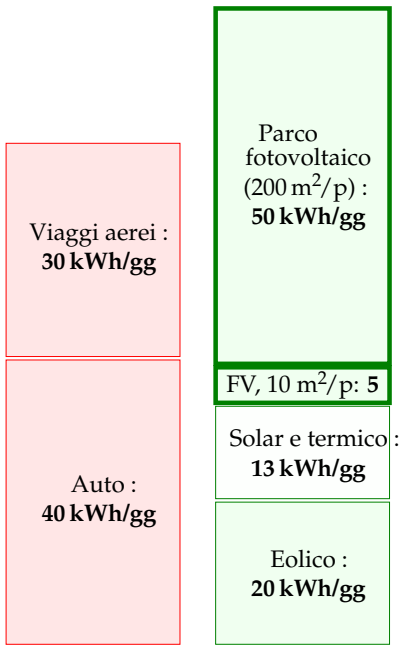


Figura 6.9. Solare fotovoltaico: una schiera di 10 m^2 di pannelli montati su di un edificio, rivolti a sud ed aventi un'efficienza del 20%, può erogare circa 5 kWh al giorno di energia elettrica. Se il 5% del territorio nazionale fosse rivestito con pannelli solari aventi un'efficienza del 10% (200 m^2 di pannelli a persona) verrebbero erogati 50 kWh/gg/p.

Per tutti questi processi le trasformazioni energetiche avvengono a tappe, la prima "tappa energetica" si trova in una molecola chimica, ad esempio un carboidrato in una pianta verde. Possiamo, dunque, fare una stima della potenza ottenibile da qualsivoglia processo, valutando la potenza in gioco in questa prima stazione. Tutte le fasi successive, che vedono coinvolti trattori, animali, impianti chimici, discariche, centrali elettriche, comportano solo perdite di energia. Sicché la potenza che appare sulla scena al primo livello è un limite superiore della potenza disponibile in tutte le soluzioni energetiche a base di vegetali. Andiamo, dunque, a valutare semplicemente la potenza disponibile al momento in cui entra in scena. (Nel Capitolo D, scenderemo più nel dettaglio, stimando il contributo massimo di ogni processo.) La potenza media che si può raccogliere dalla luce solare in Gran Bretagna è di 100 W/m^2. Le piante più efficienti in Europa sono circa il 2%-efficienti nel trasformare l'energia solare in carboidrati, il che suggerirebbe che le piante possono fornire 2 W/m^2; tuttavia, la loro efficienza diminuisce drasticamente all'aumentare dell'intensità della luce [ovvero del livello di illuminamento – rapporto tra il flusso incidente sulla superficie e l'area della superficie interessata dal flusso. (N.d.T.)], e le migliori prestazioni di qualsivoglia coltura energetica in Europa si avvicinano piuttosto ai 0.5 W/m^2. Se ricopriamo con del verde di qualità il 75% della Gran Bretagna, otteniamo 3000 m^2 a persona dedicati alla bioenergia, ovvero esattamente la porzione di territorio attualmente dedicato all'agricoltura. In questo modo la potenza massima disponibile, ignorando tutti i costi aggiuntivi di coltivazione, raccolta e trasformazione del verde, risulta essere

Figura 6.10. Alcune piante di *miscanthus* mentre si godono la compagnia della dott.ssa Emily Heaton, che è alta 5'4" (163 cm). In Gran Bretagna, il *miscanthus* raggiunge una potenza per unità di superficie pari a 0.75 W/m^2. Foto fornita dall'Università dell'Illinois.

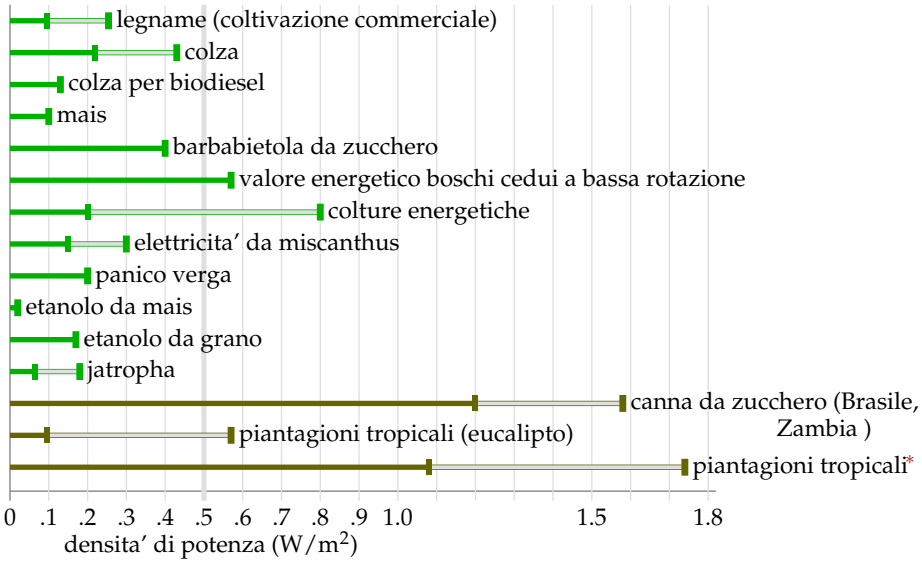


Figura 6.11. Produzione di potenza, per unità di area, raggiunta da varie piante. Per le fonti, si vedano le note finali. Queste densità di potenza variano dipendendo da irrigazione e fertilizzazione. Per alcune colture sono indicati degli intervalli, per il legno ad esempio si ha la seguente gamma di valori: 0.095–0.254 W/m^2. Le ultime tre densità di potenza sono per le colture cresciute in luoghi tropicali. L'ultima densità di potenza in fondo (piantagioni tropicali*) presuppone modificazioni genetiche, l'applicazione di fertilizzanti ed irrigazione. Nel testo, utilizzo la cifra di 0.5 W/m^2 come una sintesi delle prestazioni delle migliori colture energetiche dell'Europa Nordoccidentale.

$$0.5\,\mathrm{W/m^2} \times 3000\,\mathrm{m^2} \text{ a persona} \quad = \quad 36\,\mathrm{kWh/gg} \text{ a persona.}$$

Wow. Non è molto, considerate le ipotesi scandalosamente generose, che abbiamo appena fatto per cercare di ottenere un numero grande. Se si volessero ottenere biocarburanti per automobili o aerei dalla verzura, tutti gli altri passaggi della catena, dalla fattoria alla candela d'accensione, sarebbero inevitabilmente inefficienti.

Penso che sia ottimistico sperare che le perdite lungo la catena di trasformazione possano essere così piccole da ammontare solo al 33%. Persino bruciando legna secca in una buona caldaia si perde il 20% del calore su per il camino. Pertanto, sicuramente il vero potenziale energetico della biomassa e dei biocarburanti non può essere più grande di 24 kWh/gg a persona. E non dimenticate che vogliamo usare un po' della verzura per produrre cibo per noi e per i nostri compagni animali.

Potrebbe l'ingegneria genetica produrre piante che convertono in modo più efficiente l'energia solare in sostanze chimiche? È concepibile, ma non ho trovato alcuna pubblicazione scientifica che preveda che le piante in Europa possano raggiungere una produzione di potenza netta superiore a $1\,\mathrm{W/m^2}$.

Farò, dunque, "saltare" i 24 kWh/gg/p in cima alla pila verde, ma tengo a precisare che questo numero è, a mio parere, una sovrastima – penso che la vera potenza massima che si potrebbe ottenere dalla biomassa sia inferiore a causa delle perdite nella lavorazione agricola e nella trasformazione.

Una conclusione credo sia chiara: *i biocarburanti non aggiungono alcunché* – quantomeno, sicuramente non in Paesi come la Gran Bretagna, e non come sostituti di tutti i carburanti per autotrazione. Persino lasciando da parte i loro principali difetti – ossia che la loro produzione entra in competizione con quella del cibo, e che le richieste di energia aggiuntiva dell'agricoltura e del processo di trasformazione spesso assorbono la maggior parte dell'energia erogata (figura 6.14) – i biocarburanti a base di piante, in un Paese europeo come la Gran Bretagna, sono in grado di erogare così poca potenza che penso valga poco la pena parlarne.

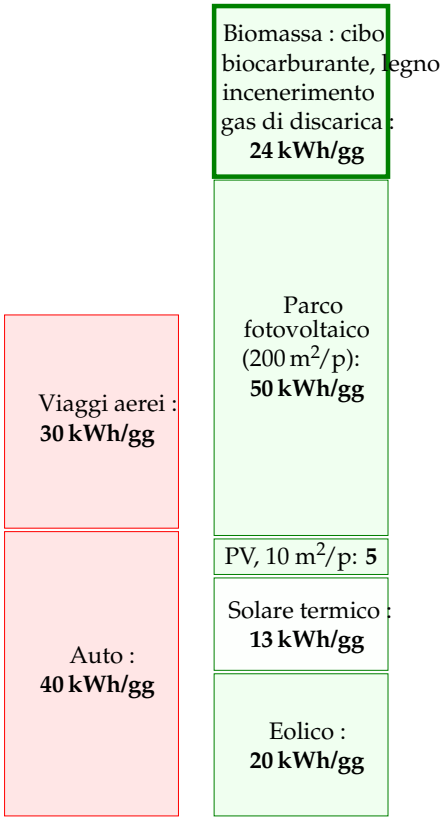


Figura 6.12. Solare da biomasse, includendo tutte le forme di biocarburanti, l'incenerimento dei rifiuti ed il cibo: 24 kWh/gg a persona.

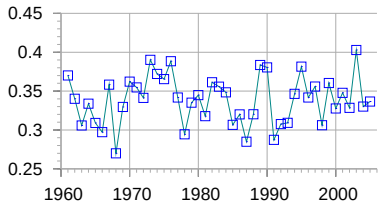


Figura 6.13. "Solarità" di Cambridge: numero di ore di Sole all'anno, espresso come frazione del numero totale di ore di luce.

Note ed approfondimenti

p.

43 *...compensare l'inclinazione tra il Sole e la Terra*. La latitudine di Cambridge è $\theta = 52°$; l'intensità della luce del Sole di mezzogiorno va moltiplicata per $\cos\theta \simeq 0.6$. Il fattore preciso dipende dal periodo dell'anno, e varia tra $\cos(\theta + 23°) = 0.26$ e $\cos(\theta - 23°) = 0.87$.

– *in una località tipica del Regno Unito il Sole splende per un terzo delle ore di luce*. Sulle Highlands il Sole splende 1100 ore all'anno – una insolazione del 25%. I luoghi migliori della Scozia ne ricevono 1400 ore all'anno – 32%. Cambridge: 1500 ± 130 h/anno – 34%. La costa meridionale dell'Inghilterra (la parte più

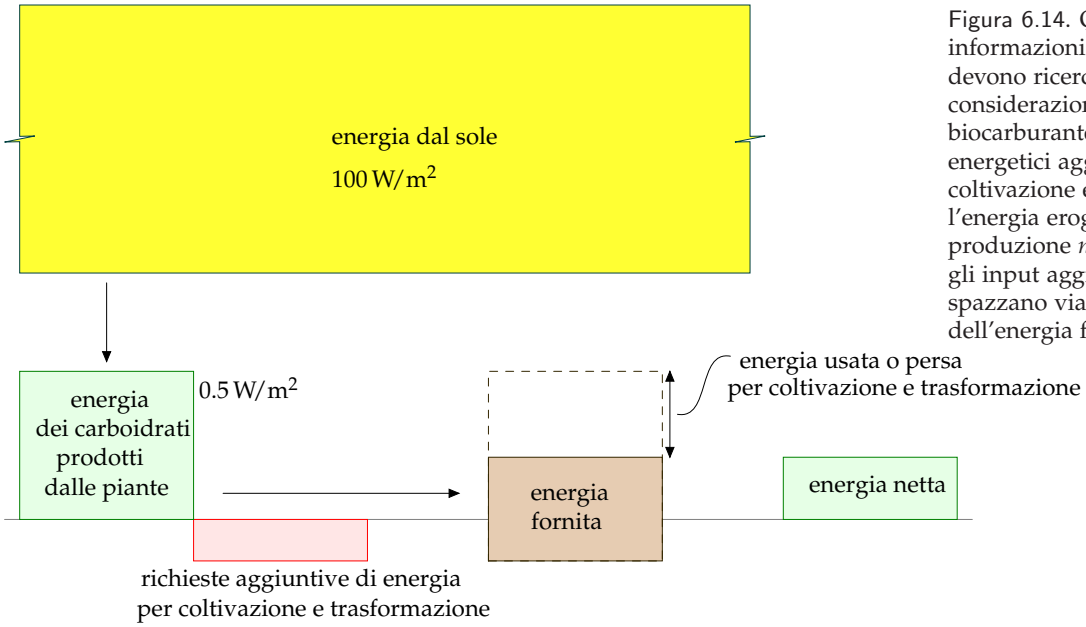


Figura 6.14. Questa figura illustra le informazioni quantitative che si devono ricercare quando si prende in considerazione l'adozione di un biocarburante. Quali sono gli apporti energetici aggiuntivi necessari per la coltivazione e la lavorazione? Qual è l'energia erogata? Qual è la produzione *netta* di energia? Spesso gli input aggiuntivi e le perdite spazzano via la maggior parte dell'energia fornita dalle piante.

soleggiata del Regno Unito): 1700 ore all'anno – 39%. [2rqloc] I dati su Cambridge provengono da [2szckw]. Si veda anche la figura 6.16.

43 *La potenza media grezza del Sole per metro quadrato di tetto esposto a sud in Gran Bretagna è pari a circa 110 W/m², e su terreno pianeggiante approssimativamente 100 W/m².* Fonte: NASA "Surface meteorology and Solar Energy" [5hrxls]. Sorpresi che ci sia così poca differenza tra un tetto inclinato a sud ed uno orizzontale? Io sì. La differenza è in realtà solo del 10% [6z9epq].

44 *...questo significherebbe circa 10 m² di pannelli a persona.* Ho calcolato la zona del tetto rivolta a sud per persona prendendo la superficie di terreno coperta da edifici a persona (48 m² in Inghilterra – tabella I.6), moltiplicandola per 1/4 in modo da ottenere la frazione a sud, e "pompando" l'area di un 40% per tenere conto dell'inclinazione del tetto. Risultato: 16 m² a persona. I pannelli sono generalmente degli scomodi rettangoli, sicché alcune frazioni del tetto rimarranno scoperte, da cui 10 m² di pannelli.

45 *La potenza media erogata dai pannelli fotovoltaici...*
Circola una falsa credenza, la quale dice che i pannelli solari producono energia in condizioni di cielo coperto quasi quanto in pieno Sole. Questo semplicemente non è vero. In una giornata luminosa ma nuvolosa, gli impianti di pannelli solari fotovoltaici continuano sì a convertire una certa quantità di energia, ma molto meno: la produzione fotovoltaica scende di circa dieci volte, quando il Sole va dietro le nuvole (dato che l'intensità della luce solare in entrata scende di dieci volte). Come mostra la figura 6.15, la potenza erogata dai pannelli fotovoltaici è quasi esattamente proporzionale all'intensità della luce solare – almeno, se i pannelli si trovano alla temperatura di 25 °C. A complicare le cose c'è il fatto che la potenza erogata dipende appunto anche

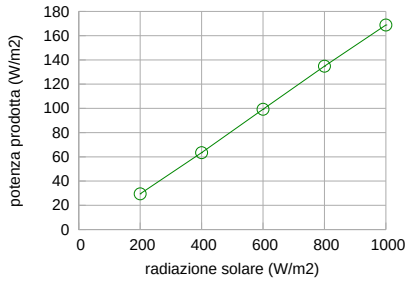


Figura 6.15. Potenza prodotta dal modulo Sanyo HIP-210NKHE1 in funzione dell'intensità della luce (a 25 °C, assumendo una tensione in uscita pari a 40 V). Fonte: scheda tecnica, www.sanyo-solar.eu.

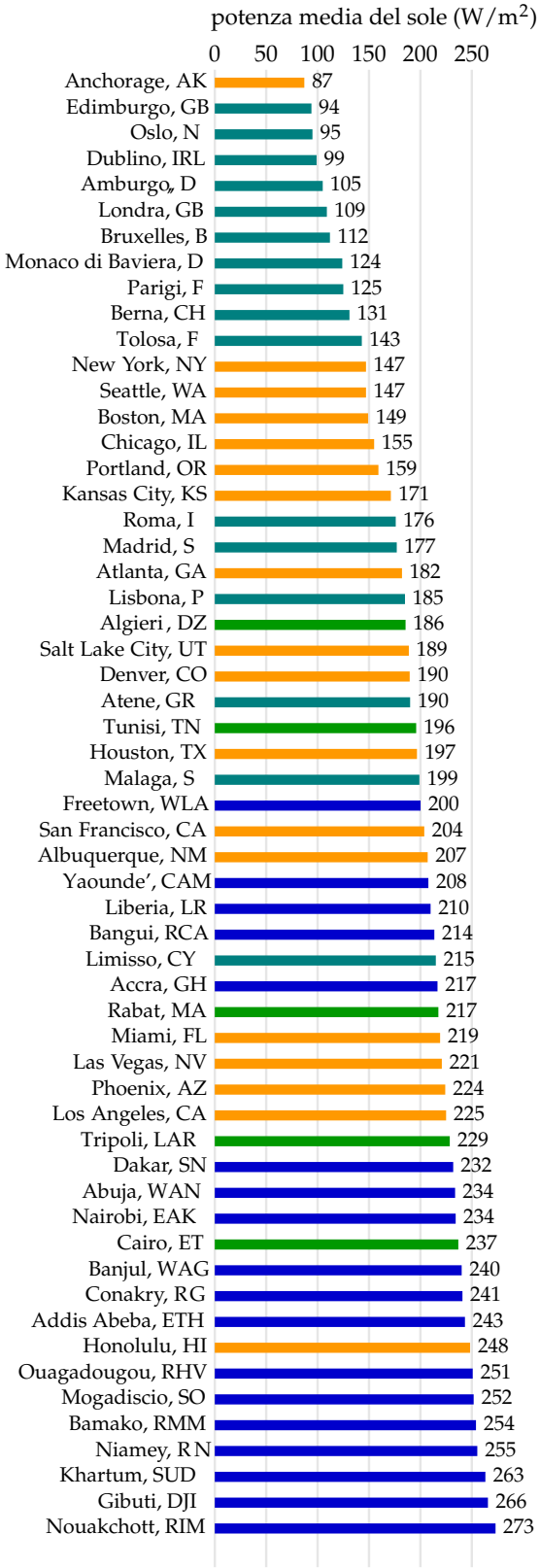


Figura 6.16. Potenza media del Sole "che picchia" su di una superficie orizzontale in luoghi selezionati dell'Europa, Nord America ed Africa.

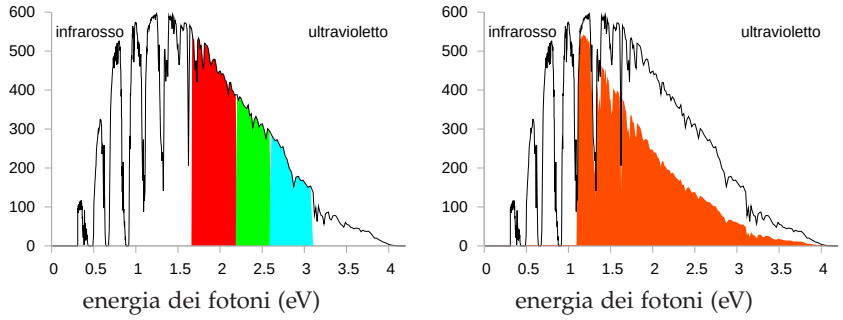


Figura 6.17. Parte della spiegazione di Shockley e Queisser riguardo al limite del 31% del rendimento del fotovoltaico semplice.
A sinistra: spettro della luce del Sole di mezzogiorno. L'asse verticale mostra la densità di potenza in W/m^2 per eV di intervallo spettrale. La parte visibile dello spettro è indicata dalla sezione colorata. A destra: l'energia catturata da un dispositivo fotovoltaico con una singola banda proibita di 1.1 eV è mostrata dalla zona ombreggiata con il colore "salsa di pomodoro". I fotoni con energia inferiore al valore della banda proibita vengono persi. Una parte dell'energia dei fotoni che supera il quantitativo necessario per il salto va persa: ad esempio metà dell'energia di ogni fotone da 2.2 eV va persa. Ulteriori perdite avvengono a causa dell'inevitabile radiazione dovuta alla ricombinazione delle cariche nel materiale fotovoltaico.

dalla temperatura – più caldi sono i pannelli più si riduce la loro potenza (in genere la perdita di potenza per °C è pari allo 0.38%) – ma se si controllano i dati reali, per esempio su `www.solarwarrior.com`, è possibile avere conferma del seguente principio essenziale: in una giornata nuvolosa la produzione è *molto inferiore* di quella in una giornata di Sole. Questo problema è offuscato da parte di alcuni promotori dei pannelli solari, quando discutono di come "l'efficienza" vari con la luce del Sole. "I pannelli sono più efficienti in condizioni di cielo coperto", dicono; questo potrebbe anche essere vero, ma l'efficienza non dovrebbe essere confusa con la potenza erogata.

44 *Tipici pannelli solari hanno in genere un rendimento del 10% circa; quelli costosi funzionano con uno al 20%.* Si veda figura 6.18. Fonti: Turkenburg (2000), Sunpower `www.sunpowercorp.com`, Sanyo `www.sanyo-solar.eu`, Suntech.

– *un dispositivo con un'efficienza superiore al 30% sarebbe piuttosto degno di nota.* Questa è una citazione tratta dall'articolo di Hopfield and Gollub (1978), i quali scrivevano a proposito di pannelli che non si avvalgono di specchi o lenti per concentrare la luce. Il limite teorico, chiamato limite di Shockley–Queisser, per un pannello solare normale, "a singola giunzione" e senza concentratori, ci dice che al massimo il 31% dell'energia della luce del Sole può essere convertito in energia elettrica (Shockley and Queisser, 1961). (La ragione principale di questo limite è che un materiale fotovoltaico standard ha una proprietà chiamata banda proibita, la quale determina l'energia dei fotoni che tale materiale riesce a convertire nel modo più efficace. La luce solare contiene fotoni con differenti energie; fotoni con energia *al di sotto* del valore del salto necessario [agli elettroni. (N.d.T.)] per superare la banda proibita non vengono utilizzati affatto; fotoni con energia *superiore* al salto possono essere catturati [dagli elettroni. (N.d.T.)], ma tutta la loro energia in eccesso è persa.) I concentratori (lenti o specchi) possono sia ridurre il costo (per watt) dei sistemi fotovoltaici, sia aumentarne l'efficienza. Il limite di Shockley–Queisser per i pannelli solari muniti di concentratori è pari ad un'efficienza del 41%. L'unica maniera di battere il limite di Shockley–Queisser è quello di rendere più "stravaganti" i dispositivi fotovoltaici dividendo la luce in diverse lunghezze d'onda, ed elaborando ogni intervallo di lunghezza d'onda con una banda proibita personalizzata. Questo è quel che si chiama fotovoltaico a giunzione multipla. Sistemi fotovoltaici a giunzione multipla prodotti di recente con concentratori ottici sono stati segnalati per avere un'efficienza pari a circa il 40%. [2tl7t6], `www.spectrolab.com`.

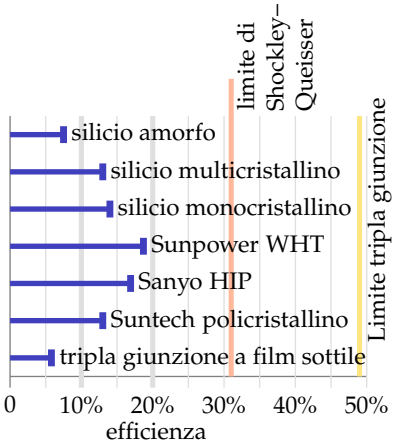


Figura 6.18. Efficienza dei moduli solari fotovoltaici in vendita oggigiorno. Nel testo ipotizzo che il fotovoltaico messo a copertura dei tetti abbia un'efficienza del 20%, mentre quello che riveste le campagne sia efficiente al 10%. In un luogo in cui la densità media di potenza della luce solare in entrata è di $100\,W/m^2$, pannelli efficienti al 20% assicurano $20\,W/m^2$.

Nel luglio 2007, l'Università del Delaware ha annunciato di aver ottenuto un'efficienza del 42.8% aumentando la concentrazione di 20 volte. [6hobq2], [2lsx6t]. Nell'agosto 2008, NREL ne ha dichiarata una pari al 40.8% con un fattore di concentrazione 326 [62ccou]. Stranamente, entrambi questi risultati sono stati acclamati come record mondiali di efficienza. Quali dispositivi a giunzione multipla sono disponibili sul mercato? Uni-solar vende un pannello a film sottile con tripla giunzione, 58 W(di picco) con una superficie di 1 m^2. Ciò implica un rendimento, in pieno Sole, di solo il 5.8%.

45 *Figura 6.5: dati del solare fotovoltaico*. Dati e fotografia forniti per gentile concessione di Jonathan Kimmitt.

– *Heliodynamics* – www.hdsolar.com. Si veda figura 6.19.
Un sistema simile è prodotto da Arontis www.arontis.se.

Figura 6.19. Un'unità fotovoltaica per la generazione combinata di calore e potenza della Heliodynamics. Un riflettore con un'area di 32 m^2 (un po' più grande del lato di un autobus a due piani) offre fino a 10 kW di potenza termica e 1.5 kW di potenza elettrica. In un Paese della Cintura del Sole, uno di questi dispositivi da una tonnellata potrebbe fornire circa 60 kWh/gg di calore e 9 kWh/gg di elettricità.
Queste potenze corrispondono a flussi medi di 80 W/m^2 di calore e 12 W/m^2 di energia elettrica (valori intesi per metro quadrato di superficie del dispositivo); questi flussi sono simili a quelli forniti da pannelli standard solari termici e solari fotovoltaici, ma il design Heliodynamics a concentrazione fornisce potenza ad un costo inferiore, dato che la maggior parte del materiale è semplicemente vetro piatto. Per confronto, il consumo totale di una persona media europea è di 125 kWh/gg.

46 *Il Solarpark a Mühlhausen, Baviera*. In media questa azienda di 25 ettari dovrebbe garantire 0.7 MW (17 000 kWh al giorno).
La stazione di Stillwell Avenue della metropolitana di New York ha integrato nella sua tettoia un sistema fotovoltaico in silicio amorfo a film sottile, che offre 4 W/m^2 (Fies et al., 2007).
La centrale solare Nellis in Nevada è stata completata nel mese di dicembre 2007, su 140 acri, e ci si aspetta che generi 30 GWh all'anno. Da cui 6 W/m^2 [5hzs5y].
La centrale solare (FV) di Serpa, in Portogallo, definito "l'impianto ad energia solare più potente al mondo", [39z5m5] [2uk8q8] è composto da pannelli "a tracciamento solare" [i.e. che seguono il moto apparente del Sole grazie all'azione di opportuni apparecchi inseguitori. (N.d.T.)] che occupano 60 ettari, vale a dire 600 000 m^2 o 0.6 km^2, e si prevede che generi 20 GWh all'anno, ossia in media 2.3 MW. Questo significa una potenza per unità di superficie pari a 3.8 W/m^2.

– *La capacità in termini di energia solare richiesta per fornire 50 kWh/gg per persona nel Regno Unito è più di 100 volte quella di tutto il fotovoltaico del mondo*. Consegnare 50 kWh/gg a persona nel Regno Unito richiederebbe 125 GW di potenza media, da cui una capacità di 1250 GW. Alla fine del 2007, il fotovoltaico installato nel mondo ammontava a 10 GW di picco; il tasso di costruzione è di circa 2 GW all'anno. [Dopo la pubblicazione del libro, nei 28 stati dell'Unione Europea la capacità installata è passata da poco meno di 20 GW nell'anno 2009 a circa 80 GW nell'anno 2013, portando il tasso di costruzione nella sola Europa a 15 GW/anno. Fonte: Enerdata, http://www.enerdata.net. (N.d.T.).]

47 *...pavimentare il 5% di questo Paese con pannelli solari appare oltre i limiti del plausibile*. La ragione principale per cui sento che un tale rivestimento del Paese sarebbe inverosimile è che agli Inglesi piace usare la loro campagna per l'agricoltura e la ricreazione, piuttosto che per l'allevamento intensivo dei pannelli solari. Un'altra preoccupazione potrebbe essere il prezzo. Questo non è un libro di economia, ma ecco alcune cifre. Tenendo per buono il prezzo di listino della "fattoria solare" bavarese, fornire 50 kWh/gg a persona avrebbe un costo di €91 000 a persona; nel caso in cui tale impianto durasse 20 anni, senza spese aggiuntive, il costo all'ingrosso dell'energia sarebbe di €0.25 per kWh. Per ulteriori approfondimenti: David Carlson, BP solar [2ahecp].

48 *La gente in Gran Bretagna getta via circa 300 g di cibo al giorno.* Fonte: Ventour (2008).

49 *Figura 6.10*. Negli USA, il *miscanthus* coltivato senza fertilizzanti azotati produce circa 24 t/ha/anno di materia secca. In Gran Bretagna, vengono riportati rendimenti di 12–16 t/ha/anno. Il *miscanthus* secco ha un potere calorifico netto di 17 MJ/kg, quindi la resa britannica corrisponde ad una densità di potenza di 0.75 W/m^2. Fonti: Heaton et al. (2004) e [6kqq77]. La resa stimata si ottiene solo dopo tre anni di crescita indisturbata.

49 *Le piante più efficienti lo sono circa al 2%; ma la potenza erogata per unità di superficie è di circa 0.5 W/m^2. A bassi livelli di intensità della luce*, le migliori piante britanniche hanno un'efficienza pari al 2.4% in campi ben fertilizzati (Monteith, 1977), ma con intensità di luce più elevate, la loro efficienza di conversione cala. Secondo Turkenburg (2000) e Schiermeier et al. (2008), l'efficienza di conversione dell'energia solare in biomassa è inferiore all'1%.
Ed ecco qualche fonte a supporto della mia stima di *0.5 W/m^2* per quanto concerne "la potenza della verzura" nel Regno Unito. La stima della Commissione Reale per l'Inquinamento dell'Ambiente concernente la densità di potenza potenzialmente erogabile da colture energetiche in Gran Bretagna è di 0.2 W/m^2 (Royal Commission on Environmental Pollution, 2004). A pagina 43 del documento sui biocarburanti della Royal Society (Royal Society working group on biofuels, 2008), il *miscanthus* è in cima alla lista, offrendo circa 0.8 W/m^2 di potenza chimica.
Nel World Energy Assessment pubblicato dall'UNDP, Rogner (2000) scrive: "Supponendo un'efficienza di conversione del 45% in energia elettrica e rese di 15 odt [i.e. 15 *oven dry ton*, ossia una certa quantità di materiale combustibile secco – 1 odt di legna sono 907 kg di legna con un contenuto di umidità pari allo 0%. (N.d.T.)] per ettaro all'anno, occorrerebbero 2 km^2 di piantagione per ogni megawatt di capacità elettrica da installazioni funzionanti 4 000 ore all'anno". Vale a dire una potenza per unità di superficie pari a 0.23 W(e)/m^2. (1 W(e) significa 1 watt di potenza elettrica.)
La società Energy for Sustainable Development Ltd (2003) stima che i boschi cedui a breve rotazione siano in grado di fornire più di 10 tonnellate di legna secca per ettaro all'anno, il che corrisponde ad una densità di potenza di 0.57 W/m^2. (La legna secca ha un potere calorifico di 5 kWh per kg.)
Secondo Archer and Barber (2004), l'efficienza istantanea di una foglia sana in condizioni ottimali può avvicinarsi al 5%, ma l'efficacia di stoccaggio dell'energia a lungo termine delle colture moderne è del 0.5–1%. Archer e Barber suggeriscono che tramite modificazioni genetiche, potrebbe essere possibile migliorare l'efficienza di stoccaggio delle piante, in particolare delle *piante C4*, che hanno già sviluppato naturalmente un percorso fotosintetico più efficiente. Le piante C4 si trovano principalmente ai tropici e prosperano a temperature elevate: non crescono a temperature inferiori ai 10 °C. Alcuni esempi di piante C4 sono la canna da zucchero, il granturco, il sorgo, l'eleusine coracana [miglio indiano. (N.d.T.)], e il panico verga. Zhu et al. (2008) calcolano che il limite teorico per l'efficienza di conversione dell'energia solare in biomassa sia del 4.6% per la fotosintesi delle C3 a 30 °C e con l'attuale concentrazione di 380 ppm di CO_2 nell'atmosfera, e del 6% per la fotosintesi delle C4. Gli stessi autori affermano che le più alte efficienze di conversione dell'energia solare registrate per le C3 e le C4 sono rispettivamente pari a 2.4% e a 3.7%; inoltre, citando Boyer (1982), riportano che le efficienze medie di conversione delle principali colture negli Stati Uniti sono 3 o 4 volte inferiori rispetto a quelle efficienze record (cioè, grossomodo un'efficienza dell'1%). Una ragione per la quale le piante non raggiungono il limite teorico è che non sono in grado di utilizzare appieno la radiazione solare. Entrambi questi documenti (Zhu et al., 2008; Boyer, 1982) discutono le prospettive per rendere queste piante più efficienti grazie all'ingegneria genetica.

– *Figura 6.11*. I numeri in questa figura sono tratti da Rogner (2000) (rese energetiche nette di legna, colza, canna da zucchero e piantagioni tropicali); Bayer Crop Science (2003) (dalla colza al biodiesel); Francis et al. (2005) e Asselbergs et al. (2006) (jatropha); Mabee et al. (2006) (canna da zucchero, Brasile); Schmer et al. (2008) (panico verga e terreno agricolo marginale in USA); Shapouri et al. (1995) (dal mais all'etanolo); Royal Commission on Environmental Pollution (2004); Royal Society working group on biofuels (2008); Energy for Sustainable Development Ltd (2003); Archer and Barber (2004); Boyer (1982); Monteith (1977).

50 *Persino dar fuoco alla legna secca in una buona caldaia significa perdere il 20% del calore su per il camino.* Fonti: Royal Society working group on biofuels (2008); Royal Commission on Environmental Pollution (2004).

7 Riscaldamento e raffrescamento

Questo capitolo esplora quanta energia spendiamo per il controllo della temperatura dell'ambiente che ci circonda – a casa e al lavoro – per il riscaldamento o il raffreddamento del nostro cibo e delle bevande, per lavanderia e piatti sporchi.

Figura 7.1. Un branco di nuove case.

Riscaldamento dell'acqua per usi domestici

Il grande uso di acqua calda in una casa dipende dal numero di bagni, docce, lavaggi di piatti o vestiti e dalla loro durata – insomma, dipende dal vostro stile di vita. Per prima cosa stimiamo l'energia utilizzata per fare un bagno caldo.

Ipotizziamo che il volume di acqua in una vasca da bagno sia di 50 cm × 15 cm × 150 cm ≃ 110 litri, la temperatura dell'acqua nella vasca sia di 50 °C (120 F), mentre quella dell'acqua in ingresso nella casa sia di 10 °C. La capacità termica dell'acqua, che è di 4200 J per litro per °C, ci dà una misura della quantità di energia necessaria per riscaldarla. Pertanto, l'energia necessaria per riscaldare l'acqua di 40 °C è

$$4200\,\mathrm{J/litro/^\circ C} \times 110\,\mathrm{litro} \times 40\,^\circ\mathrm{C} \simeq 18\,\mathrm{MJ} \simeq 5\,\mathrm{kWh}.$$

Farsi un bagno significa, dunque, usare all'incirca 5 kWh. A titolo di paragone, una doccia (30 litri) comporta l'uso di circa 1.4 kWh.

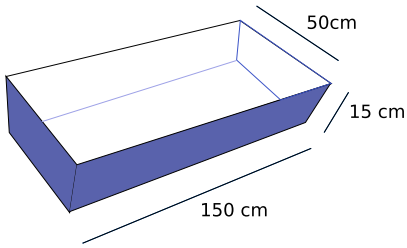


Figura 7.2. L'acqua contenuta in una vasca da bagno.

Pentole e fornelli

La Gran Bretagna, essendo un Paese civilizzato, dispone di una rete di distribuzione elettrica la cui tensione domestica è di 230 V nominali. Con questo voltaggio, possiamo usare un bollitore elettrico per far bollire alcuni litri di acqua in un paio di minuti. Tali bollitori hanno una potenza di 3 kW. Perché 3 kW? Perché questa è la più grande potenza che una presa da 230 volt è in grado di fornire in uscita senza che la corrente superi il massimo consentito, ossia 13 ampere [Nel Regno Unito l'utenza domestica non viene limitata nella potenza elettrica massima – come in Italia, dove superata la soglia, in genere di 3 kW, scatta il contatore – ma si impone che gli apparecchi non assorbano più di 13 A. (N.d.T.)]. Nei Paesi in cui la tensione è di 110 V, occorre il doppio del tempo per farsi una tazza di tè.

Se un nucleo familiare tiene il bollitore acceso per 20 minuti al giorno, ne consegue un consumo medio di 1 kWh al giorno. (Calcolerò le prossime voci "per nucleo familiare", tenendo conto di 2 persone per nucleo.)

Un piccolo anello di un fornello elettrico ha la stessa potenza di un tostapane: 1 kW. Le piastre ad alta potenza forniscono 2.3 kW. Se si utilizzano due anelli del fornello alla massima potenza per una mezz'ora al giorno, questo corrisponde a 1.6 kWh al giorno.

$$230\,\mathrm{V} \times 13\,\mathrm{A} \quad = \quad 3000\,\mathrm{W}$$

Microonde:
1400 W di picco

Frigorifero combinato:
100 W di picco,
18 W di media

Figura 7.3. Potenza assorbita da un dispositivo di riscaldamento e da uno di raffreddamento.

Dispositivo	potenza	tempo al giorno	energia al giorno
Cucinare			
– pentola	3 kW	1/3 h	1 kWh/gg
– microonde	1.4 kW	1/3 h	0.5 kWh/gg
– piano cottura elettrico (anelli)	3.3 kW	1/2 h	1.6 kWh/gg
– forno elettrico	3 kW	1/2 h	1.5 kWh/gg
Pulire			
– lavatrice	2.5 kW		1 kWh/gg
– asciugatrice	2.5 kW	0.8 h	2 kWh/gg
– armadio-asciugatoio			0.5 kWh/gg
– stendipanni			0 kWh/gg
– lavastoviglie	2.5 kW		1.5 kWh/gg
Raffreddare			
– frigorifero	0.02 kW	24 h	0.5 kWh/gg
– freezer	0.09 kW	24 h	2.3 kWh/gg
– condizionatore	0.6 kW	1 h	0.6 kWh/gg

Tabella 7.4. Dati sui consumi energetici per nucleo familiare concernenti dispositivi per il riscaldamento e il raffreddamento.

Un forno a microonde di solito ha la propria potenza di cottura indicata sulla parte anteriore: il mio dice 900 W, ma ne *consuma* in realtà circa 1.4 kW. Se usate il microonde per 20 minuti al giorno, significa che consumate 0.5 kWh al giorno.

Un forno normale "tracanna" di più: circa 3 kW quando è messo al massimo. Se si utilizza il forno per un'ora al giorno e lo si mette alla massima potenza per la metà del tempo, si hanno 1.5 kWh al giorno.

Acqua calda : **12 kWh/gg**

Figura 7.5. Il totale dell'acqua calda, sia a casa che al lavoro – tra cui bagno, doccia, lavaggio vestiti, fornelli, bollitori, forno a microonde e lavaggio delle stoviglie – è di circa 12 kWh al giorno per persona. Ho usato un colore chiaro per lo sfondo di questa casella per indicare che tale potenza può essere fornita da una fonte di energia termica, ossia da una forma di energia non pregiata.

Panni caldi e piatti caldi

Lavatrice, lavastoviglie ed asciugatrice impiegano tutte una potenza di all'incirca 2.5 kW quando sono in azione.

Una lavatrice utilizza circa 80 litri di acqua per ogni carico, con un costo energetico di circa 1 kWh se la temperatura è impostata sui 40 °C. Se per asciugare i vestiti usiamo un armadio-asciugatoio, invece di un'asciugatrice, per far evaporare l'acqua è comunque necessario del calore – grosso modo 1.5 kWh per asciugare un carico di vestiti, invece di 3 kWh.

Facendo i conti con le stime relative all'acqua calda, ritengo che sia utile facilitare le cose usando l'approssimazione 12 kWh al giorno per persona.

Figura 7.6. Una grossa stufa elettrica: 2 kW.

Aria calda – a casa e al lavoro

Ora, si impiega più potenza nello scaldare acqua e cibo, o nello scaldare l'aria all'interno dei nostri edifici tramite i radiatori?

Un modo per valutare quanta energia viene "consumata" ogni giorno per scaldare l'aria è quello di immaginare un edificio riscaldato esclusiva-

mente mediante radiatori elettrici, con i quali ci risulta più familiare fare i conti della potenza. La potenza di una piccola stufetta elettrica a barre o ad aria è di 1 kW (24 kWh al giorno). In inverno, potrebbe essere necessaria una di queste per tenere al calduccio una persona. In estate, nessuna. Pertanto, si stima che in media una persona moderna abbia *bisogno* di utilizzare 12 kWh al giorno per l'aria calda. Ma la maggior parte delle persone usa più di quanto abbia bisogno, mantenendo contemporaneamente diverse camere al caldo (cucina, soggiorno, corridoio e bagno, per esempio); quindi, un dato relativo al consumo plausibile per l'aria calda è pari a circa il doppio: 24 kWh al giorno per persona.

Questo capitolo si accompagna al Capitolo Tecnico E, che contiene un resoconto più dettagliato di dove se ne va il calore in un edificio. Il modello ivi fornito permette di prevedere il risparmio di calore che si ha girando il termostato, mettendo doppi vetri alle finestre, e così via.

Aria calda :
24 kWh/gg

Figura 7.7. Il totale dell'aria calda – compreso il riscaldamento domestico e sul posto di lavoro – è di circa 24 kWh al giorno per persona.

Il riscaldamento all'aria aperta, ed altri lussi vari

C'è una crescente tendenza a riscaldare l'aria all'aperto con stufe a forma di fungo. Queste hanno tipicamente una potenza di 15 kW; quindi, se se ne utilizza una per un paio d'ore ogni sera, si ha un "extra-costo" di 30 kWh al giorno.

Un lusso più modesto è la coperta elettrica. Una coperta elettrica per un letto matrimoniale impiega 140 W, facendola funzionare per un'ora si usano 0.14 kWh.

Raffreddamento

Frigorifero e freezer

Noi controlliamo non solo la temperatura dell'acqua sanitaria e dell'aria degli ambienti interni in cui viviamo, ma anche quella all'interno degli armadi del freddo che piazziamo nelle nostre case calde. Il mio frigorifero combinato, riprodotto in figura 7.3, consuma 18 W in media – il che vale a dire grosso modo 0.5 kWh/gg.

Aria condizionata

Nei Paesi dove la temperatura supera i 30 °C, l'aria condizionata è vista come una necessità, ed il costo energetico per assicurare il controllo della temperatura può essere grande. Tuttavia, questa parte del libro riguarda il consumo energetico britannico, e le temperature della Gran Bretagna comportano poco bisogno di aria condizionata (figura 7.8).

Un modo economico per ottenere aria condizionata è quello di usare un impianto a pompa di calore aria-aria. Un condizionatore elettrico montato sulla finestra di una camera singola utilizza 0.6 kW di elettricità e (in

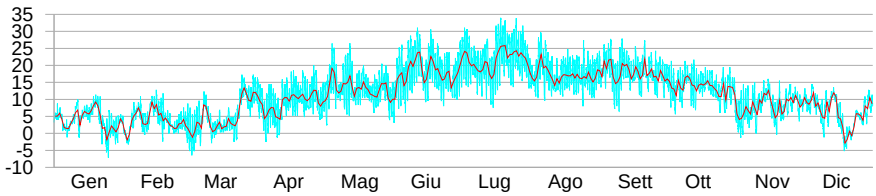


Figura 7.8. Temperatura di Cambridge in gradi Celsius, giorno per giorno (linea rossa), ed ogni mezz'ora (linea blu) nel corso del 2006.

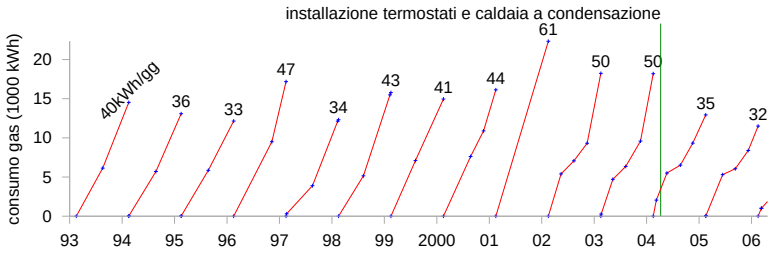


Figura 7.10. I miei consumi domestici e cumulativi di gas, in kWh, ogni anno dal 1993 al 2005. Il numero in cima ad ogni linea-segmento corrispondente all'anno è il tasso medio di consumo energetico, in kWh al giorno. Per scoprire che cosa è successo nel 2007, continuate a leggere!

quanto scambiatore di calore) eroga 2.6 kW di raffrescamento. Per stimare la quantità di energia che qualcuno potrebbe usare nel Regno Unito per un impianto di condizionamento, ho ipotizzato che questi lo tenga acceso per circa 12 ore al giorno per 30 giorni all'anno. Durante questo periodo di tempo l'aria condizionata utilizza 7.2 kWh. Il consumo medio per l'intero anno è 0.6 kWh/gg.

Raffrescamento : **1 kWh/gg**

Figura 7.9. Totale del raffrescamento – tra cui un refrigeratore (frigorifero/congelatore) e d'estate un po' d'aria condizionata – 1 kWh/gg.

La stima di questo capitolo inerente il costo del raffreddamento – 1 kWh/gg a persona – include questo tipo di aria condizionata e l'uso di un frigorifero domestico. Inoltre, teniamo presente che la nostra società si premura di controllare la temperatura del cibo nel passaggio dai campi alla sporta della spesa. Fornirò una stima del costo in termini di potenza della catena del freddo nel Capitolo 15.

Totale riscaldamento più raffrescamento

La nostra stima grezza del totale di energia che una persona arriva a spendere per il riscaldamento e il raffreddamento a casa, sul posto di lavoro e cucinando, è di 37 kWh/gg a persona (12 per scaldare l'acqua, 24 per scaldare l'aria ed 1 per refrigerare).

La prova che questa stima si trova sul campo di gioco giusto, magari un po' defilata su di un lato, viene dal mio consumo domestico di gas, che per 12 anni si è mantenuto su di una media di 40 kWh al giorno (figura 7.10). Al momento ho pensato che ero un utente piuttosto frugale, ma non ero attento al mio consumo di energia effettivo. Il Capitolo 21 rivelerà quanta potenza ho preservato una volta che ho iniziato a prestarci attenzione.

Dal momento che il riscaldamento è un elemento importante nella nostra pila dei consumi, cerchiamo di controllare le mie stime confrontandole con alcune statistiche nazionali. A livello nazionale, nel 2000 il consumo

medio *domestico* per il riscaldamento degli ambienti, l'acqua e la cottura è stato pari a 21 kWh al giorno per persona, mentre nel *settore dei servizi* il consumo per il riscaldamento, il raffrescamento, la ristorazione e l'acqua calda era di 8.5 kWh/gg/p. Per una stima del riscaldamento degli ambienti di lavoro, prendiamo il consumo di gas dell'Università di Cambridge nel 2006–7: 16 kWh/gg ad impiegato.

Tirando le somme con questi tre numeri, una seconda ipotesi per la spesa nazionale inerente il riscaldamento diviene $21 + 8.5 + 16 \simeq 45$ kWh/gg a persona, sempre che l'Università di Cambridge sia un luogo di lavoro normale. Bene, questo si avvicina in modo rassicurante alla nostra prima ipotesi di 37 kWh/gg.

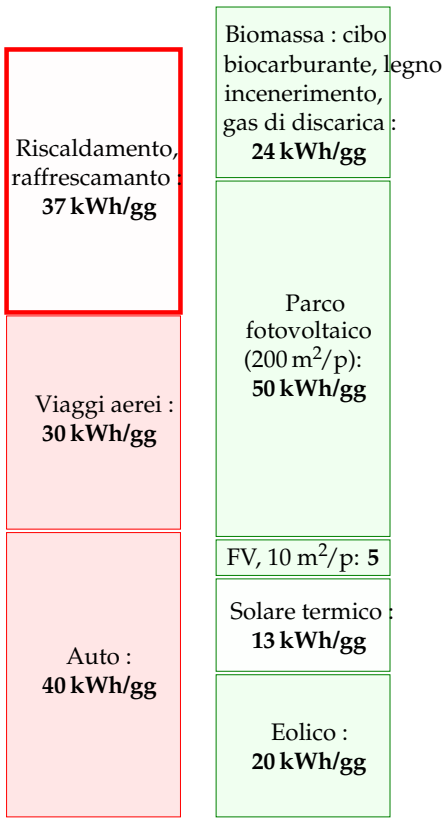


Figura 7.11. Riscaldamento e raffrescamento – circa 37 unità al giorno a persona. Ho rimosso l'ombreggiatura da questa casella ad indicare che essa rappresenta una potenza che potrebbe essere fornita da energia termica, ossia di bassa qualità.

Note ed approfondimenti

p.

57 *Un forno impiega 3 kW.* Ovviamente c'è tutta una serie di potenze. Molti forni hanno una potenza massima di 1.8 kW o 2.2 kW. I forni al top della gamma impiegano qualcosa come 6 kW. Ad esempio, il Whirlpool AGB 487/WP, stufa elettrica della serie a 4 piastre di cottura, presenta un forno da 5.9 kW e 4 piastre da 2.3 kW.
`www.kcmltd.com/electric_oven_ranges.shtml`
`www.1stforkitchens.co.uk/kitchenovens.html`
[In un'abitazione media italiana questi elettrodomestici non sarebbero utilizzabili a meno di richiedere al fornitore di energia elettrica un nuovo contratto. (N.d.T.).]

– *Un armadio-asciugatoio richiede circa 1.5 kWh per asciugare un carico di vestiti.* Ho calcolato questo pensando al mio bucato: un carico di vestiti, 4 kg a secco, come emergono dalla mia lavatrice Bosch pesano 2.2 kg in più (anche dopo una buona centrifuga tedesca). Il calore latente della vaporizzazione dell'acqua a 15 °C è di circa 2500 kJ/kg. Per ottenere la cifra giornaliera in tabella 7.4 ho supposto che una persona faccia un carico di lavatrice ogni tre giorni, e che tutto questo succhi calore prezioso alla casa nel corso del semestre freddo dell'anno. (In estate, l'armadio-asciugatoio offre un po' di aria condizionata, in quanto l'acqua che evapora raffredda l'aria della casa.)

60 *A livello nazionale, il consumo domestico medio era di 21 kWh/gg/p; quello nel settore dei servizi 8.5 kWh/gg/p.* Fonte: Dept. of Trade and Industry (2002a).

– *Nel 2006–7, il consumo di gas dell'Università di Cambridge era di 16 kWh/gg ad impiegato.* Il consumo di gas e petrolio dell'Università di Cambridge (escludendo i College) era di 76 GWh nel 2006–7. Ho dichiarato quello dell'Università in quanto luogo di lavoro di 13 300 persone (8602 dipendenti e 4667 ricercatori post-laurea). Il suo consumo di energia elettrica, per inciso, era di 99.5 GWh. Fonte: University utilities report.

8 Idroelettrico

Figura 8.1. Diga di Nant-y-Moch, parte di un sistema idroelettrico da 55 MW in Galles. Foto di Dave Newbould, `www.origins-photography.co.uk`.

Per avere potenza idroelettrica occorrono due ingredienti: l'altitudine e le precipitazioni piovose. Valutiamo l'energia totale di tutta la pioggia che scorre giù sino al livello del mare.

Per questa previsione idroelettrica, dividerò la Gran Bretagna in due: la parte inferiore, la porzione più asciutta, che chiamerò "terre basse" e quella superiore, la porzione più umida, che chiamerò "terre alte". Sceglierò la città di Bedford ed il paesello di Kinlochewe come rappresentanti di queste due regioni.

Facciamo le terre basse per prime. Per stimare la potenza gravitazionale della pioggia nelle terre basse, si moltiplicano le precipitazioni a Bedford (584 mm all'anno) per la densità dell'acqua (1000 kg/m^3), la forza di gravità (10 m/s^2) e la quota tipica di queste terre sopra il mare (vale a dire 100 m). La potenza per unità di superficie ci dà 0.02 W/m^2. Questa è la potenza per unità di superficie di un terreno sul quale piove.

Se moltiplichiamo questo per la superficie a persona (ossia 2700 m^2, ripartendo equamente le terre basse tra tutti i 60 milioni di Britannici), troviamo una potenza media lorda di circa 1 kWh al giorno per persona. Questo è in assoluto il limite superiore della potenza idroelettrica nelle terre basse, laddove ogni fiume sia stato arginato ed ogni goccia perfettamente sfruttata. Volendo, però, essere realistici, muniremo di dighe solo quei fiumi che presentano un considerevole salto geodetico [i.e. "altezza di caduta" o "salto d'acqua" – caratteristica fondamentale di un impianto idroelettrico, pari alla differenza di quota tra il pelo libero dell'invaso, o canale di carico, e quello del canale di scarico. (N.d.T.)], con aree di

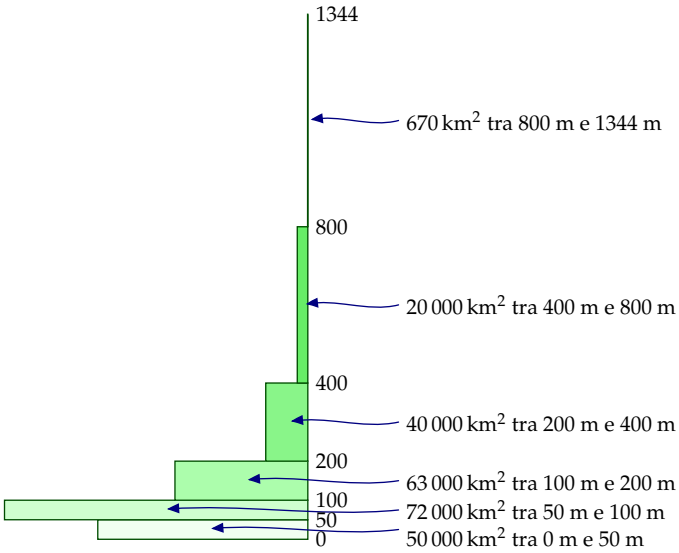


Figura 8.2. Altitudini del territorio in Gran Bretagna. I rettangoli mostrano quanta superficie si trova ad ogni altezza.

raccolta della pioggia [i.e. bacini imbriferi. (N.d.T.)] molto inferiori alla superficie dell'intero Paese. Inoltre, gran parte dell'acqua evapora prima che arrivi nelle vicinanze di una turbina, e nessun sistema idroelettrico riesce a sfruttare tutta l'energia potenziale dell'acqua. Arriviamo così ad una conclusione definitiva sulla potenza dell'acqua delle terre basse. Le persone possono divertirsi a costruire centrali idroelettriche "ad acqua fluente" e altri sistemi di piccola taglia, ma nelle terre basse tali strutture non saranno mai in grado di offrire più di 1 kWh al giorno per persona. Rivolgiamo, ora, l'attenzione alle terre alte. Kinlochewe è un luogo più piovoso: si arriva ad avere 2278 mm l'anno, quattro volte più di Bedford. Ci sono pure differenze di altezza più grandi – vaste aree del territorio si trovano a più di 300 m dal livello del mare. Nel complesso, una potenza per metro quadrato dodici volte superiore è, dunque, plausibile per le regioni montagnose. La potenza lorda per unità di superficie è all'incirca 0.24 W/m^2. Se le terre alte generosamente condividono la loro energia idroelettrica con il resto del Regno Unito (posto che si hanno 1300 m^2 a persona), troviamo un limite superiore pari a circa 7 kWh al giorno per persona. Come nelle terre basse, questo è il tetto massimo per la potenza pura, valido solo nel caso in cui l'evaporazione venisse messa fuori legge e ogni goccia fosse perfettamente sfruttata.

Qual è una stima verosimile del limite nella pratica? Tiriamo ad indovinare, facciamo il 20% di quell'altro – 1.4 kWh al giorno, ed arrotondiamolo un po' per eccesso, in modo da tener conto della produzione nelle terre basse: 1.5 kWh al giorno.

La potenza effettiva da idroelettrico nel Regno Unito è, ad oggi, pari a 0.2 kWh/gg a persona, sicché questi 1.5 kWh/gg a persona richiederebbero un aumento della potenza idroelettrica di sette volte.

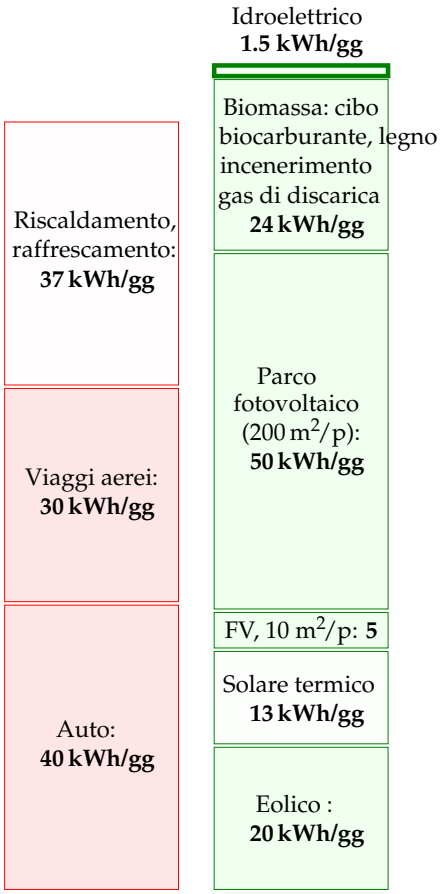


Figura 8.3. Idroelettricità.

Note ed approfondimenti

p.

61 *Precipitazioni* le statistiche provengono dal centro meteo della BBC.

62 *La potenza lorda per unità di superficie (della pioggia delle "terre alte") è grosso modo* 0.24 W/m^2. Siamo in grado di controllare questa stima confrontandola con la densità di potenza effettiva del sistema idroelettrico di Loch Sloy, completato nel 1950 (Ross, 2008). Il bacino imbrifero del Loch Sloy è di circa 83 km^2 [la parola *loch* identifica in gaelico sia un lago, sia un fiordo, sia in generale un'insenatura della costa marina — lo Sloy è un lago. (N.d.T.)]; le precipitazioni ammontano a circa 2900 mm all'anno (un po' di più dei 2278 mm/anno di Kinlochewe); mentre la produzione di energia elettrica nel 2006 è stata di 142 GWh, il che corrisponde ad una densità di potenza di 0.2 W per metro quadro di superficie del bacino imbrifero. Il Loch Sloy si estende per un'area di circa 1.5 km^2; quindi, l'impianto idroelettrico eroga una potenza di 11 W per metro quadro di superficie del lago. In questo modo, i pendii delle colline, gli acquedotti ed i tunnel che portano l'acqua a

Loch Sloy agiscono come un potente concentratore, ossia un sistema capace di concentrare la potenza 55 volte.

62 *La potenza effettiva da idroelettrico è oggi nel Regno Unito di 0.2 kWh al giorno per persona.* Fonte: MacLeay et al. (2007). Nel 2006, l'idroelettrico su larga scala ha prodotto 3515 GWh (da impianti con una capacità di 1.37 GW), quello su piccola scala 212 GWh (0.01 kWh/gg/p) (da una capacità di 153 MW).
Nel 1943, quando l'idroelettricità si stava sviluppando a pieno ritmo, gli ingegneri della società North of Scotland Hydroelectricity Board calcolarono che le Highlands erano in grado di produrre 6.3 TWh all'anno distribuiti su 102 impianti – che corrisponderebbe a 0.3 kWh/gg a persona nel Regno Unito (Ross, 2008) [le *Highlands* sono la regione montuosa della Scozia e il nome significa letteralmente "Terre Alte"; tuttavia, in tutto il capitolo con tale termine non viene indicata solo questa parte precisa del Regno Unito, ma un insieme più ampio. (N.d.T.)].
Glendoe, il primo nuovo grande progetto idroelettrico nel Regno Unito dal 1957, aggiungerà una capacità di 100 MW ed è previsto che fornisca 180 GWh all'anno. Il bacino imbrifero di Glendoe è di 75 km^2, quindi la sua densità di potenza per unità di supeficie del bacino è di 0.27 W per m^2. Glendoe è stato annunciato come "grande abbastanza per alimentare la città di Glasgow". Ma se facciamo condividere i suoi 180 GWh/anno tra tutta la popolazione di quella città (616 000 abitanti), si ottengono solo 0.8 kWh/gg a persona. Questo valore corrisponde al 5% del consumo medio di energia elettrica per persona, che è pari a 17 kWh/gg/p. Si è, dunque, esagerato di 20 volte, e tale risultato lo si è ottenuto parlando, da un lato, della produzione di picco di Glendoe, piuttosto che di quella *media*, che è 5 volte più piccola, e, dall'altro, di "case", anziché della potenza elettrica totale di Glasgow (si veda p. 369).

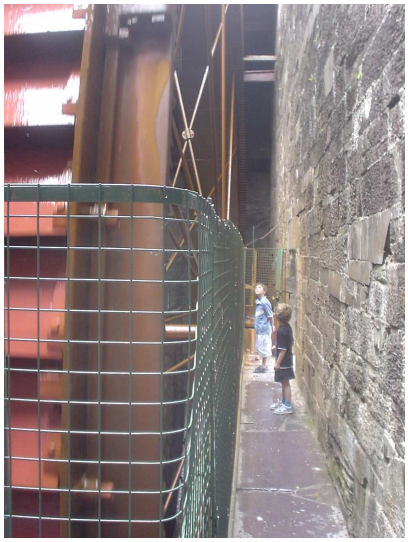


Figura 8.4. Una ruota idraulica da 60 kW .

9 Illuminazione

Illuminazione a casa ed al lavoro

Le lampadine più luminose per uso domestico impiegano 250 W, quelle da comodino 40 W. In una lampadina ad incandescenza vecchio stile, la maggior parte della potenza viene trasformata in calore, piuttosto che in luce. Una lampadina a fluorescenza può produrre una quantità uguale di luce utilizzando un quarto della potenza di una ad incandescenza.

Quanta potenza impiega una persona moderatamente benestante per l'illuminazione? La mia stima approssimativa, basata sulla Tabella 9.2, è che una tipica casa occupata da due persone con un mix di lampadine a basso consumo e ad alta energia utilizza circa 5.5 kWh al giorno, ossia 2.7 kWh per al giorno per persona. Presumo che ogni persona abbia anche un posto di lavoro dove condivide un tipo di illuminazione simile coi propri colleghi, immaginando che il posto di lavoro utilizzi 1.3 kWh/giorno per persona, si ottiene nel complesso una cifra tonda di 4 kWh/gg a persona.

Lampioni e semafori

Dobbiamo includere anche l'illuminazione pubblica, per ottenere una stima precisa, oppure casa e lavoro dominano il bilancio dell'illuminazione? Le luci stradali, in effetti, comportano un impiego di circa 0.1 kWh al giorno per persona, ed i semafori solo 0.005 kWh/gg per persona – entrambi valori trascurabili, in confronto alla nostra illuminazione di casa e sul posto di lavoro. Che dire di altre forme di illuminazione pubblica – insegne luminose e dissuasori, per esempio? Ce ne sono di meno rispetto alle luci stradali, e i lampioni sono già entrati in pieno sotto il raggio d'azione del nostro radar; non c'è bisogno, quindi, di modificare la nostra stima complessiva di 4 kWh/gg a persona.

Luci nel traffico

In alcuni Paesi gli automobilisti devono accendere i fari ogni volta che mettono in moto la loro auto. In che modo la potenza aggiuntiva richiesta da

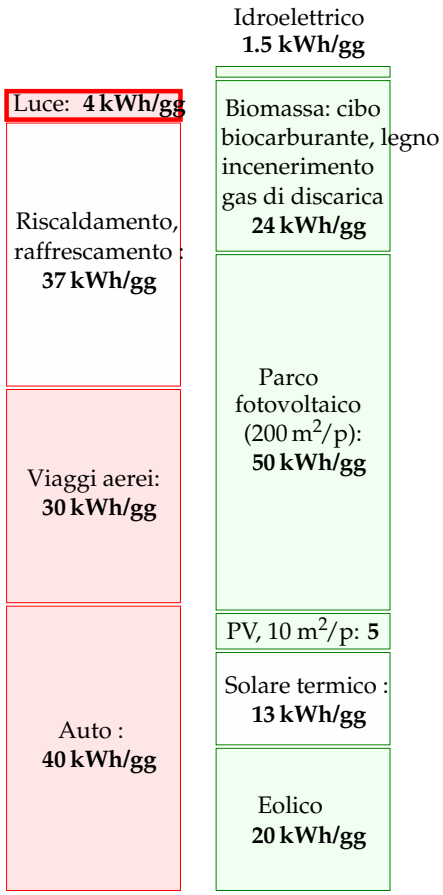


Figura 9.1. Illuminazione – 4 kWh al giorno per persona.

Dispositivo	Potenza	Tempo di utilizzo giornaliero	Energia al giorno per abitazione
10 lampade ad incandescenza	1 kW	5 h	5 kWh
10 lampade a basso consumo	0.1 kW	5 h	0.5 kWh

Tabella 9.2. Consumo elettrico per l'illuminazione domestica. Un totale plausibile è di 5.5 kWh per abitazione al giorno. Una cifra simile si ha sul luogo di lavoro. Può darsi che in tutto siano 4 kWh al giorno per persona.

tale politica si confronta con la potenza già impiegata per far viaggiare la macchina? Ipotizziamo che un'automobile abbia quattro luci ad incandescenza per un totale di 100 W. L'elettricità per tali lampade è fornita da un motore efficiente al 25%, che alimenta un generatore efficiente al 55%; dunque la potenza richiesta è di 730 W. Per confronto, una tipica auto procedendo con una velocità media di 50 km/h e consumando un litro ogni 12 km impiega in media una potenza pari a 42 000 W. Pertanto, tenere le luci accese mentre si guida richiede un 2% di potenza extra.

Che dire delle auto elettriche del futuro? Il consumo energetico di una tipica auto elettrica è si aggira intorno ai 5000 W; quindi, facendo spuntare una richiesta extra di 100 W il consumo aumenterebbe del 2%. D'altra parte il consumo di energia sarebbe inferiore se sostituissimo tutte le lampade dell'auto con diodi emettitori di luce, ma se prestiamo giusto un po' più di attenzione a questo argomento, scopriremo di essere incappati in un grave caso di mania delle "piccole azioni" .

Analisi economica delle lampadine a basso consumo

In genere evito di discutere di economia, ma mi piacerebbe fare un'eccezione per le lampadine. Osram sostiene che una sua lampadina a basso consumo energetico da 20 W dia in uscita la stessa luce di una lampadina ad incandescenza da 100 W. Inoltre, si dice che abbia una vita di 15 000 ore (o "12 anni", a 3 ore al giorno). Al contrario, una tipica lampadina ad incandescenza dovrebbe durare 1000 ore. Quindi, nel corso di un periodo lungo 12 anni, si ha la seguente scelta (figura 9.3): comprare 15 lampadine ad incandescenza e 1500 kWh di energia elettrica (ad un costo di circa £150), oppure comprarne una a basso consumo energetico e 300 kWh di energia elettrica (ad un costo di circa £30).

Devo aspettare che muoia la vecchia lampadina, prima di sostituirla?

Sembra uno spreco, vero? Qualcuno ha messo delle risorse nel fabbricare la vecchia lampadina ad incandescenza, non dovremmo monetizzare l'investimento originario utilizzando la lampadina fino a quando non è consumata del tutto? Ma la risposta economica è chiara: *continuare ad usare una lampadina vecchia significa scambiare la moneta buona con quella cattiva*. Se siete riusciti a trovare un soddisfacente sostituto a basso consumo, sostituite la lampadina vecchia ora.

Che dire del mercurio nelle lampadine fluorescenti compatte? Sono meglio le lampadine a LED di quelle fluorescenti?

I ricercatoridicono che le lampadine a LED (diodi emettitore di luce) [acronimo inglese: Light-Emitting Diodes. (N.d.T.)] saranno presto ancora più efficienti rispetto a quelle fluorescenti compatte. L'efficienza di una lampadina è misurata in *lumen per watt*. Ho controllato i numeri sui miei ultimi acquisti: la lampadina a fluorescenza compatta Philips Genie da

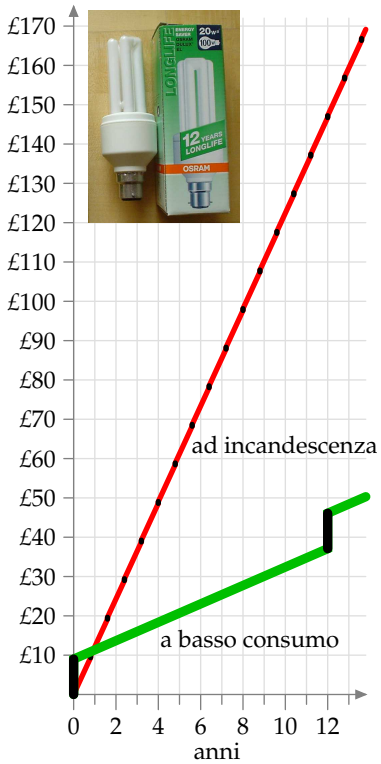


Figura 9.3. . Totale del costo complessivo di utilizzo di una tradizionale lampadina ad incandescenza da 100 W per 3 ore al giorno, a fronte della sostituzione *ora* con una Osram Dulux Longlife Energy Saver (nella foto). Presupposti: costo dell'energia elettrica pari a 10p per kWh [un "penny" (p) è un centesimo di sterlina – pl. "pence". (N.d.T.)]; costo della sostituzione delle lampadine tradizionali a 45p ciascuna; costo delle lampadine a risparmio energetico pari a £9. (So che se ne possono trovare di più convenienti, ma il grafico mostra che anche a £9, sono molto più economiche).

11 W (figura 9.4) ha una luminosità di 600 lumen, il che significa un rendimento di **55 lumen per watt**; le normali lampadine ad incandescenza forniscono **10 lumen per watt**; la luminosità della lampadina Omicron da 1.3 W, che ha 20 LED bianchi nascosti all'interno, è di 46 lumen, da cui un'efficienza di **35 lumen per watt**. Pertanto, questa lampadina a LED è quasi efficiente quanto una a fluorescenza. L'industria LED ha ancora un po' di ritardo da recuperare. A suo favore, la lampadina a LED ha una vita di 50 000 ore, otto volte la vita della lampadina fluorescente. Mentre scrivo, vedo che su `www.cree.com` vendono LED con una potenza di **100 lumen per watt**. Si prevede che in futuro i LED bianchi avranno un'efficienza luminosa pari ad oltre 150 lumen per watt [`ynjzej`]. Mi aspetto che nel giro di un paio d'anni, il consiglio migliore, dal punto di vista dell'efficienza energetica e per evitare l'inquinamento da mercurio, sarà quello di utilizzare lampadine a LED.

Figura 9.4. Una Philips da 11 W a fianco ad una Omicron a LED da 1.3 W.

Tipo di lampadina	Efficienza (lumen/W)
Ad incandescenza	10
Alogena	16–24
LED bianco	35
Compatta fluorescente	55
Grande fluorescente	94
Luce stradale al sodio	150

Tabella 9.5. Efficienza di illuminazione delle lampadine disponibili in commercio. Si prevede che in futuro i LED bianchi forniranno 150 lumen per watt.

False credenze

"Non ha alcun senso passare a lampadine a risparmio energetico. L'energia 'persa' che le lampadine buttano fuori mi riscalda casa, quindi non è sprecata".

Questo mito è trattato nel Capitolo 11, p. 78.

Note ed approfondimenti

p.

64 *Le luci stradali utilizzano circa 0.1 kWh per giorno a persona...* C'è circa un lampione al sodio ogni 10 persone; ogni luce ha una potenza di 100 W e rimane accesa per 10 ore al giorno. Questo significa 0.1 kWh al giorno a persona.

– *...ed i semafori solo 0.005 kWh/gg a persona.* La Gran Bretagna ha 420 000 lampadine tra semafori e segnali pedonali, con un consumo di 100 milioni di kWh di elettricità all'anno. Suddividendo 100 milioni di kWh all'anno tra 60 milioni di persone si hanno 0.005 kWh/gg a persona.

– *Ci sono meno insegne e dissuasori luminosi che lampioni* [`www.highwayelectrical.org.uk`]. Nel Regno Unito ci sono 7.7 milioni di unità di illuminazione (illuminazione stradale, insegne luminose e dissuasori). Di questi, circa 7 milioni sono luci stradali e 1 milione segnali stradali illuminati. Ci sono 210 000 segnalatori di traffico.
Secondo DUKES 2005, la potenza totale per l'illuminazione pubblica è di 2095 GWh/anno, ossia pari a 0.1 kWh/gg a persona.

65 *generatore efficiente al 55%* – Fonte: `en.wikipedia.org/wiki/Alternator`. I generatori delle centrali elettriche sono assai più efficienti nel convertire il lavoro meccanico in elettricità.

10 Eolico sul mare

Il parco eolico offshore London Array darà un contributo determinante per gli obiettivi del Regno Unito inerenti l'energia rinnovabile.

James Smith, chairman di Shell UK

L'energia elettrica è un bene troppo vitale perché lo si usi come merce di scambio con un programma di creazione di posti di lavoro per l'industria delle turbine eoliche.

David J. White

In mare, i venti sono più forti e più costanti rispetto alla terraferma, sicché i parchi eolici off-shore offrono una maggiore potenza per unità di area dei parchi eolici on-shore. Il parco eolico di Kentish Flats nell'estuario del Tamigi, circa 8.5 km al largo di Whitstable e Herne Bay, entrato in esercizio alla fine del 2005, era previsto avere una potenza media per unità di superficie di 3.2 W/m^2. Nel 2006, la sua potenza media per unità di superficie è stata di 2.6 W/m^2.

Assumerò che una potenza per unità di superficie pari a 3 W/m^2 (superiore per un 50% alla nostra stima di 2 W/m^2 sulla terraferma) sia un valore appropriato per i parchi eolici off-shore, al largo tutto intorno al Regno Unito.

Ora abbiamo bisogno di una stima della superficie di mare che potrebbe plausibilmente essere ricoperta di turbine eoliche. Per convenzione si distingue tra eolico off-shore *in acque poco profonde* ed eolico off-shore *in acque profonde*, come illustrato in figura 10.2. La saggezza della convenzione sembra consistere nel fatto che l'eolico in mare aperto ed *in acque poco profonde* (profondità inferiore a 25–30 m), pur essendo circa due volte più costoso dell'eolico su terraferma, sia economicamente fattibile, con sussidi modesti; mentre quello *in acque profonde* sia per il momento nient'affatto economico. Oggi come oggi, nel 2008, c'è solo un parco eolico in mare aperto nelle acque profonde del Regno Unito, un prototipo sperimentale che invia tutta la sua energia elettrica ad una piattaforma petrolifera nelle vicinanze, chiamata Beatrice.

Figura 10.1. Kentish Flats – un parco eolico off-shore in acque poco profonde. Ciascun rotore ha un diametro di 90 m centrato ad un'altezza del mozzo di 70 m. Ogni turbina da 3 MW pesa 500 tonnellate, la metà delle quali sono nelle fondamenta.
Foto © Elsam (`elsam.com`). Utilizzate dietro permesso.

In mare aperto in acque poco profonde

All'interno delle acque territoriali britanniche, l'area poco profonda è di circa 40 000 km^2, la maggior parte di essa al largo della costa dell'Inghilterra e del Galles. Questa zona è all'incirca pari a due Galles.

La potenza media resa disponibile da parchi eolici off-shore in acque poco profonde che occupassero tutte queste aree sarebbe 120 GW, ossia 48 kWh/gg a persona. Ma è difficile immaginare che questa disposizione sia soddisfacente per il trasporto su nave. Pezzi sostanziali di queste

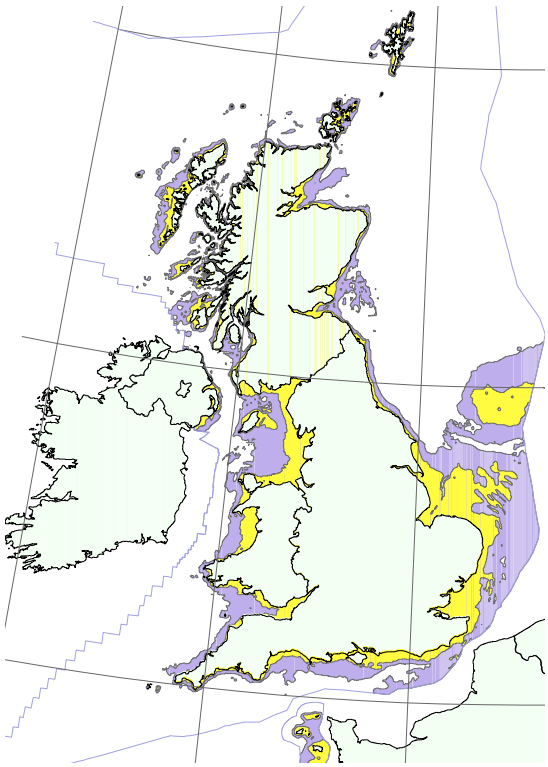
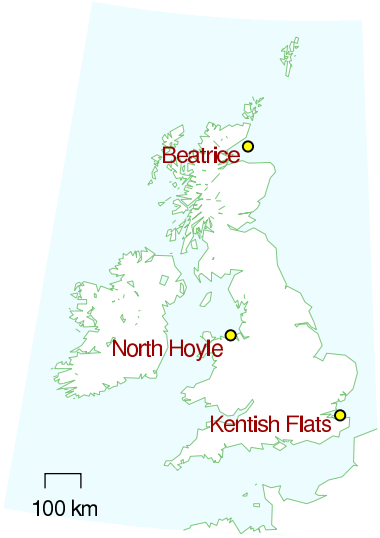


Figura 10.2. Acque territoriali del Regno Unito con profondità inferiore a 25 m (giallo) e profondità compresa tra 25 m e 50 m (viola). I dati provengono dall'Atlante delle Risorse Marine Rinnovabili del Dipartimento del Commercio e dell'Industria. © Crown copyright.



acque basse rimarrebbero, ne sono certo, interdetti ai parchi eolici. L'esigenza di corridoi di navigazione e zone di pesca impone una riduzione dell'area plausibilmente disponibile; propongo che si assuma che la frazione disponibile sia un terzo (ma, per favore, si vedano le note finali di questo capitolo per una prospettiva più pessimista!). In questo modo si stima che la massima potenza ipotizzabile dovuta al vento in alto mare ed in acque poco profonde sia di 16 kWh/gg a persona.

Prima di procedere, ci tengo a sottolineare quanto sia grande l'area – due terzi di Galles – che sarebbe necessaria per fornire questi 16 kWh/gg a persona. Se prendessimo il totale della linea costiera della Gran Bretagna (lunghezza: 3000 km), e ponessimo in giro tutt'attorno una striscia di turbine larga 4 km, quella fascia avrebbe una superficie di 13 000 km^2. Questa è l'area che dobbiamo riempire di turbine per fornire 16 kWh/gg a persona. Mettiamola in un altro modo, consideriamo il numero di turbine necessarie. 16 kWh/gg a persona verrebbero erogati tramite 44 000 turbine da 3 MW ciascuna, il che equivale a 15 ogni chilometro di linea costiera, se fossero distribuite uniformemente intorno ai 3000 km di costa.

Le installazioni dell'eolico off-shore sono dure da tirar via, a causa degli effetti corrosivi dell'acqua di mare. Presso il grande parco eolico danese di Horns Reef, si è dovuto smantellare e riparare tutte le 80 turbine dopo l'esposizione a soli 18 mesi di aria di mare. Le turbine di Kentish Fla-

ts sembrano avere problemi simili con le loro trasmissioni: un terzo da sostituire nei primi 18 mesi.

In mare aperto in acque profonde

La zona con profondità comprese tra 25 m e 50 m è di circa 80 000 km^2 – le dimensioni della Scozia. Assumendo, di nuovo, una potenza per unità di superficie di 3 W/m^2, i parchi eolici off-shore "in acque profonde" potrebbero fornire altri 240 GW, ossia 96 kWh/gg a persona, qualora si riempisse completamente di turbine suddetta area. Anche qui, però, occorrono corridoi per la navigazione. Suggerisco, come prima, che si supponga di poter utilizzare per i parchi eolici un terzo della superficie; l'area sarebbe pertanto grande circa quanto il 30% del Galles, e gran parte di essa potrebbe trovarsi al largo, oltre i 50 km. Risultato: se una superficie pari ad una fascia di 9 km di larghezza, tutt'attorno alla costa, venisse riempita con delle turbine, l'eolico offshore in acque profonde potrebbe fornire una potenza di 32 kWh/gg a persona. Una quantità enorme di potenza; sì, ma ancora non corrisponde al nostro enorme consumo. E non abbiamo parlato del problema dell'intermittenza del vento. Ci torneremo su nel Capitolo 26.

Includerò questo potenziale contributo dell'eolico in mare aperto nella pila della produzione, con una clausola, come ho detto prima, ossia che gli esperti dell'eolico facciano i conti con i costi proibitivi dell'offshore in acque profonde.

Alcuni raffronti e costi

Allora, come procede la nostra gara tra consumo e produzione? Una volta aggiunti al blocco della produzione sia l'eolico off-shore in acque poco profonde che quello in acque profonde, ecco che la pila verde è in vantaggio. Una cosa, però, vorrei farvi notare su questa corsa, ossia il seguente contrasto: per quanto sia *facile* gettare un ceppo più grande nel fuoco del consumo, è altrettanto *difficile* far crescere il blocco della produzione. Mentre scrivo questo paragrafo, sento un po' di freddo, così mi alzo, faccio due passi, vado dal mio termostato e lo alzo. È così semplice per me consumare un supplemento di 30 kWh al giorno. Ma spremere un extra di 30 kWh al giorno per persona dalle fonti rinnovabili richiede un'industrializzazione dell'ambiente così grande che è difficile anche solo immaginarla.

Generare 48 kWh al giorno di eolico off-shore per persona nel Regno Unito richiederebbe 60 milioni di tonnellate di cemento ed acciaio – una tonnellata a persona. La produzione annua di acciaio a livello mondiale è di circa 1200 milioni di tonnellate, il che vale a dire 0.2 tonnellate per persona nel mondo. Durante la seconda guerra mondiale, i cantieri navali americani costruirono 2751 navi Liberty, ciascuna contenente 7000 tonnellate di acciaio – da cui un totale di 19 milioni di tonnellate di acciaio, ossia 0.1 tonnellate per ogni americano. Dunque, la costruzione di 60 milioni

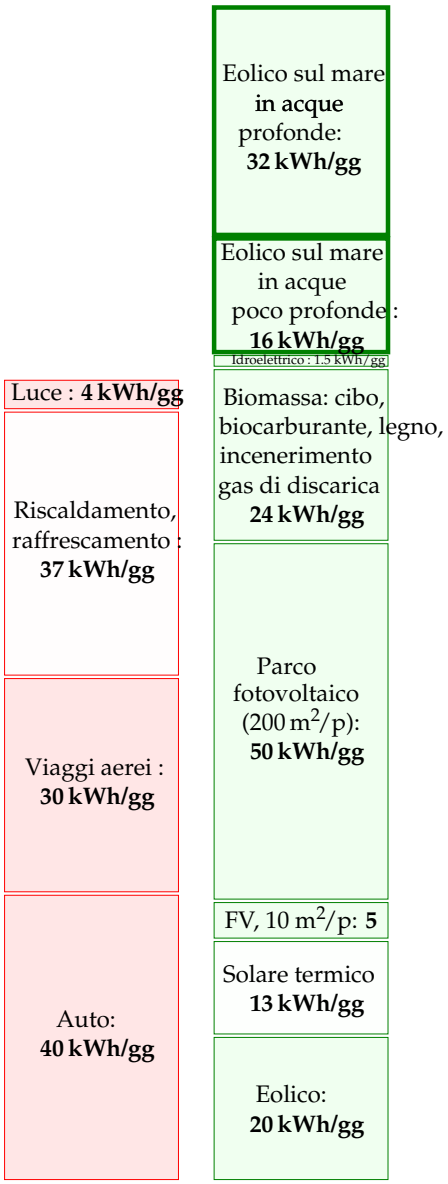


Figura 10.3. Eolico offshore.

di tonnellate di turbine eoliche non è fuori scala di realizzabilità, ma non ci si illuda pensando che sia facile. Costruire un numero tale di "mulini a vento" è una grossa e prode impresa come quella delle "navi della Libertà".

Per fare un confronto, avere 48 kWh al giorno di energia nucleare a persona nel Regno Unito richiederebbe 8 milioni di tonnellate di acciaio e 140 milioni di tonnellate di calcestruzzo. Possiamo anche confrontare i 60 milioni di tonnellate di ferraglia eolica, che stiamo cercando di immaginare, con l'esistente apparato gas-più-petrolio, già adagiato dentro ed intorno al Mare del Nord (figura 10.4). Nel 1997, 200 installazioni e 7000 km di condotte nelle acque del Regno Unito del Mare del Nord contenevano 8 milioni di tonnellate di acciaio e calcestruzzo. Il gasdotto Langeled, di nuova costruzione, dalla Norvegia alla Gran Bretagna, che trasporta gas con una potenza di 25 GW (10 kWh/gg/p), ha utilizzato un altro milione di tonnellate di acciaio ed un altro milione di tonnellate di calcestruzzo (figura 10.5).

Il Governo britannico ha annunciato il 10 dicembre 2007 che avrebbe permesso la creazione di 33 GW di capacità eolica off-shore (che avrebbe consegnato al Regno Unito, in media, 10 GW, ossia 4.4 kWh al giorno per persona), un piano marcato "pia illusione" da alcuni nel settore eolico. Teniamo per buona una cifra tonda di 4 kWh al giorno per persona. Questa è un quarto dei miei 16 kWh al giorno per persona dall'eolico in acque poco profonde. Ottenere questa potenza media richiede circa 10 000 turbine eoliche da "3 MW" come quelle in figura 10.1. (Hanno una capacità di "3 MW", ma in media erogano 1 MW. Ho fatto comparire le virgolette attorno ai 3 MW ad indicare che trattasi di una capacità, una potenza di picco.)

Quale sarebbe il costo di costruzione di questi "33 GW" di potenza? Beh, il parco da "90 MW" di Kentish Flats costa £105 mln, così "33 GW" verrebbero a costare all'incirca £33 mld. Un modo per illustrare questo costo di £33 mld, inerente un eolico off-shore che eroga oltre 4 kWh/gg a persona, è quello di suddividerlo tra la popolazione del Regno Unito: viene fuori che sono £550 a testa. Si tratta di un affare assai migliore, tra l'altro, delle micro-turbine. Una micro-turbina montata sul tetto attualmente costa circa £1500 e, anche con una velocità del vento molto ottimista di 6 m/s, offre solo 1.6 kWh/gg. In realtà, in una tipica località urbana in Inghilterra, tali turbine erogano 0.2 kWh al giorno.

Un altro collo di bottiglia vincolante la piantumazione di turbine eoliche sono le navi speciali richieste. Erigere 10 000 torri eoliche ("33 GW") in un periodo di 10 anni richiederebbe circa 50 chiatte con gru. Queste costano £60 mln ciascuna, quindi sarebbe necessario un investimento di capitale aggiuntivo pari a £3 mld. Il che non strappa l'applauso se raffrontato al prezzo di listino di £33 mld, già citato, ma la necessità di chiatte munite di gru è certamente un dettaglio che richiede una qualche pianificazione in avanti.

Figura 10.4. La piattaforma Magnus, nel settore settentrionale del Mare del Nord appartenente al Regno Unito, contiene 71 000 tons di acciaio. Nel 2000 questa piattaforma ha consegnato 3.8 milioni di tonnellate di petrolio e di gas – una potenza di 5 GW. Costo della piattaforma: £1.1 mld.
Foto di Terry Cavner.

Figura 10.5. Tubazioni per Langeled. Dalla Bredero–Shaw [`brederoshaw.com`].

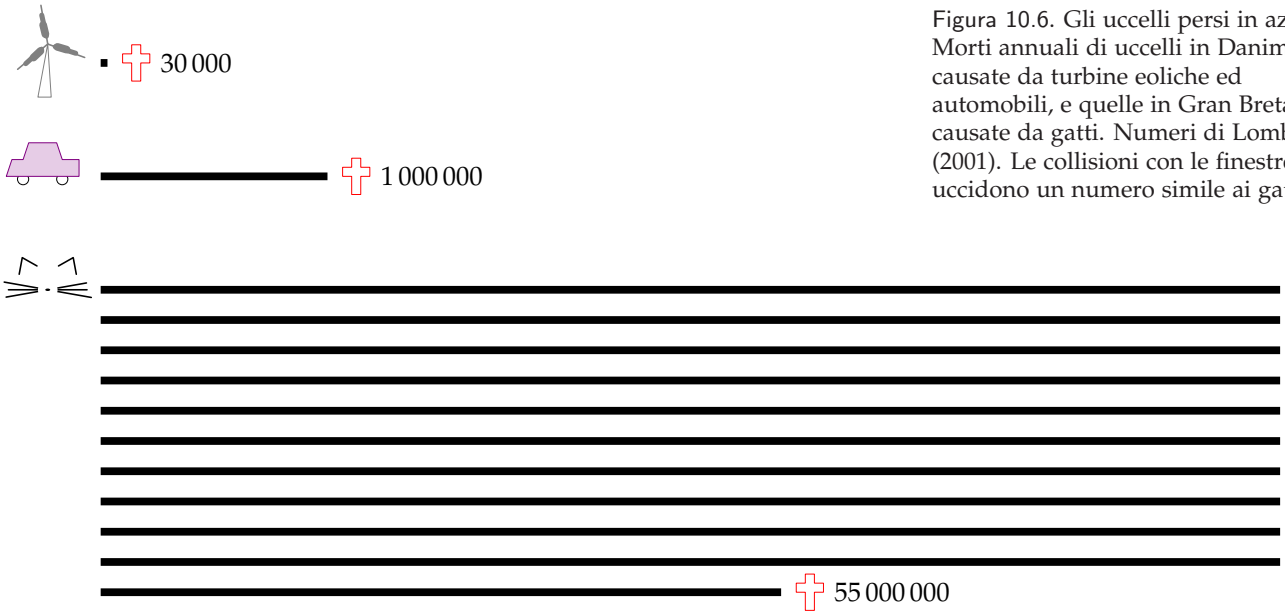


Figura 10.6. Gli uccelli persi in azione. Morti annuali di uccelli in Danimarca causate da turbine eoliche ed automobili, e quelle in Gran Bretagna causate da gatti. Numeri di Lomborg (2001). Le collisioni con le finestre ne uccidono un numero simile ai gatti.

Il costo per gli uccelli

Ma le pale eoliche non uccidono un "enorme numero" di uccelli? I parchi eolici hanno recentemente ottenuto una cattiva pubblicità dalla Norvegia, dove le turbine eoliche sullo Smola, una serie di isole al largo della costa nord-occidentale, hanno ucciso 9 aquile dalla coda bianca in 10 mesi. Condivido la preoccupazione di Bird Life International per il benessere degli uccelli rari. Ma credo che, come sempre, sia importante dare dei numeri. È stato stimato che 30 000 volatili all'anno vengono uccisi dalle turbine eoliche in Danimarca, dove i mulini a vento generano il 19% dell'elettricità. Orrore! Bando alle pale eoliche! Apprendiamo anche, peraltro, che il *traffico* uccide *un milione* di uccelli ogni anno in Danimarca. Trenta-volte-di-più orrore! Questo è un incentivo trenta-volte-maggiore a vietare le automobili! Ed in Gran Bretagna, 55 milioni di uccelli ogni anno vengono uccisi dai *gatti* (figura 10.6).

Proseguendo da solo sull'onda delle emozioni, mi piacerebbe vivere in un Paese praticamente privo di automobili, praticamente senza "mulini a vento" e con un sacco di gatti e uccelli (con i gatti che predano gli uccelli e che magari vengono predati da aquile dalla coda bianca norvegesi, per pareggiare le cose). Ma quello che mi auguro davvero è che le decisioni su auto e pale eoliche siano prese grazie ad un attento pensiero razionale, non solo sulla spinta emotiva. Forse abbiamo bisogno delle pale eoliche!

Note ed approfondimenti

p.

67 *Il parco eolico di Kentish Flats nell'estuario del Tamigi...*
Si veda `www.kentishflats.co.uk`. Le sue 30 turbine eoliche Vestas V90 hanno un'uscita totale di picco pari a 90 MW, e l'uscita media era prevista ammontare a 32 MW (assumendo un fattore di carico del 36%). La velocità media del vento all'altezza del mozzo è di 8.7 m/s. Le turbine stanno in acque profonde 5 m, sono disposte a 700 m le une dalle altre, ed occupano una superficie di 10 km^2. La densità di potenza di questo parco eolico off-shore è stata, quindi, prevista essere 3.2 W/m^2. Di fatto, la potenza media in uscita è stata di 26 MW, pertanto il fattore di carico medio nel 2006 è stato del 29% [`wbd80`]. Da cui una densità di potenza pari a 2.6 W/m^2. Il parco eolico di North Hoyle al largo di Prestatyn, nel Galles del Nord, ha avuto un fattore di carico più elevato, del 36%, nel 2006. le sue trenta turbine da 2 MW occupano 8.4 km^2. Dunque, la loro densità media di potenza è stata di 2.6 W/m^2.

67 *...l'eolico off-shore in acque poco profonde, pur costando grosso modo due volte quello on-shore, è economicamente fattibile, con sussidi modesti.* Fonte: Danish wind association `windpower.org`.

– *...l'eolico off-shore in acque profonde al momento non è economicamente fattibile.*
Fonte: informativa della British Wind Energy Association, settembre 2005, `www.bwea.com`. Ciononostante, un progetto dimostrativo in mare aperto ed in acque profonde mise, nel 2007, due turbine adiacenti all'area petrolifera Beatrice, 22 km al largo della costa orientale della Scozia (figura 10.7). Ogni turbina ha una "capacità" di 5 MW e si trova in acque profonde 45 m. Altezza del mozzo: 107 m; diametro 126 m. Tutta l'energia elettrica generata viene utilizzata dalle piattaforme petrolifere. Non è straordinario!? Il progetto da 10 MW è costato £30 mln – questo prezzo di listino di £3 per watt (picco) può essere confrontato con quello di Kentish Flats, £1.2 per watt (£105 mln for 90 MW). `www.beatricewind.co.uk`
È possibile che le turbine eoliche *galleggianti* cambino l'economia dell'eolico in acque profonde.

68 *La superficie disponibile per l'eolico in mare aperto.*
Il documento del Dipartimento del Commercio e dell'Industria [d'ora in poi DCI. (N.d.T.)] (2002) "Futuro dell'Offshore" offre una ripartizione dettagliata delle aree utili per l'energia eolica off-shore. La Tabella 10.8 mostra risorse stimate per 76 000 km^2 di acque basse e profonde. Il contributo in termini di potenza calcolato dal DCI, nel caso in cui queste aree fossero *interamente* riempite di pale eoliche, è di 146 kWh/gg per persona (composto di 52 kWh/gg/p dall'eolico in acque poco profonde e di 94 kWh/gg/p dall'eolico in acque profonde). Ma la stima del DCI concernente le risorse realmente potenziali per la generazione di energia eolica off-shore ammonta ad appena 4.6 kWh al giorno per persona.

Figura 10.7. La costruzione del parco eolico dimostrativo Beatrice, in mare aperto ed in acque profonde. Foto gentilmente fornite da Talisman Energy (UK) Limited.

Potrebbe essere interessante descrivere il modo in cui si scende da una risorsa potenziale di 146 kWh/gg a persona ad una di 4.6 kWh/gg a persona. Perché la cifra finale è molto inferiore alla nostra? In primo luogo, essi hanno imposto questi limiti: le acque interessate debbono essere entro i 30 km dalla costa e profonde meno di 40 m; il fondo del mare

Regione	profondità 5 - 30 metri		profondità 30 - 50 metri	
	area (km^2)	risorsa potenziale (kWh/gg/p)	area (km^2)	risorsa potenziale (kWh/gg/p)
Nord Ovest	3 300	6	2 000	4
Greater Wash	7 400	14	950	2
Estuario del Tamigi	2 100	4	850	2
Altro	14 000	28	45 000	87
TOTALE	27 000	52	49 000	94

Tabella 10.8. Risorsa potenziale di generazione da eolico off-shore in regioni strategiche proposte, nel caso in cui tali regioni fossero *interamente riempite* di turbine eoliche. Fonte: Dept. of Trade and Industry (2002b).

non deve avere pendenza superiore ai 5°; rotte di navigazione, zone militari, condotte, zone di pesca e riserve naturali sono escluse. In secondo luogo, essi hanno assunto che solo il 5% dei siti potenziali sarà sviluppato (a causa della composizione del suolo o dei vincoli di pianificazione); hanno, poi, ridotto del 50% la capacità di tutti i siti a meno di 10 miglia dalla costa, per ragioni di pubblica accettazione, ed ulteriormente ridotto del 95% la capacità dei siti con velocità del vento superiore ai 9 m/s, per tenere conto di "barriere allo sviluppo imposte da un ambiente ostile". Altri siti, con velocità media del vento pari a 8–9 m/s, si sono visti ridurre la capacità del 5%.

68 *...se prediamo tutta la linea costiera della Gran Bretagna (lunghezza: 3000 km), e poniamo in giro una striscia di turbine larga 4 km tutt'attorno...* I pedanti diranno che "la linea costiera della Gran Bretagna non ha una lunghezza ben definita, perché la costa è un frattale". Sì, sì, è un frattale. Ma, cari saccenti, siete pregati di prendere una mappa e mettere una striscia di turbine larga 4 km intorno alla Gran Bretagna, e vedere se non è vero che la striscia è in effetti lunga circa 3000 km.

– *Horns Reef* (Horns Rev). Le difficoltà attinenti a questo parco eolico danese da "160 MW" a largo dello Jutland [`www.hornsrev.dk`] sono descritte da Halkema (2006).
Quando è in funzione, il fattore di carico di Horns Reef è 0.43 e la potenza media per unità di superficie risulta essere 2.6 W/m^2.

69 *Navi della Libertà* –
`www.liberty-ship.com/html/yards/introduction.html`

70 *...gli impianti relativi ai combustibili fossili nel Mare del Nord contenevano 8 milioni di tonnellate di acciaio e cemento* – Rice and Owen (1999).

– *- Il Governo britannico ha annunciato il 10 dicembre 2007 che avrebbe permesso la creazione di 33 GW di capacità off-shore...* [`25e59w`].

– *... "una pia illusione"*. Fonte: Guardian [`2t2vjq`].

– *quanto verrebbero a costare "33 GW" di eolico offshore?* Secondo il DCI, nel novembre 2002 il costo dell'energia elettrica da impianti eolici off-shore era grosso modo £50 per MWh (5p per kWh) (Dept. of Trade and Industry, 2002b, p. 21). Tuttavia, i dati economici variano e nel mese di aprile del 2007 il costo stimato per l'off-shore è arrivato a £92 per MWh (Dept. of Trade and Industry, 2007, p. 7). Entro aprile 2008, il prezzo dell'eolico offshore è aumentato in maniera evidente: la Shell si è tirata fuori dall'impegno per costruire il London Array. È perché il vento in mare aperto è così costoso che il Governo si trova a dover aumentare il numero di COR (Certificati Obbligazionari per le Rinnovabili) per unità di energia eolica off-shore. Il COR è l'unità di sovvenzione emessa per certe forme di produzione dell'energia elettrica rinnovabile. Il valore standard di un COR è di £45, con 1 COR per MWh; quindi con un prezzo all'ingrosso di circa £40/MWh, i generatori di energia rinnovabile vengono sempre pagati £85 per MWh. Pertanto 1 COR per MWh non è una sovvenzione sufficiente a coprire il costo di £92 per MWh. Nello stesso documento, le stime per le altre

fonti rinnovabili (costi medi livellati per il 2010) sono le seguenti. Eolico on-shore: £65–89/MWh; co-combustione di biomasse: £53/MWh; idroelettrico su larga scala: £63/MWh; gas da liquami: £38/MWh; solare FV: £571/MWh; onde: £196/MWh; maree: £177/MWh.
"Dale Vince, amministratore delegato di Ecotricity, società erogatrice di energia verde, impegnata nella costruzione di parchi eolici on-shore, ha detto di sostenere i piani del Governo [eolico off-shore. (N.d.A.)], ma solo a condizione che non siano a discapito dell'eolico on-shore. 'È pericoloso trascurare le fantastiche risorse che abbiamo in questo Paese... In base alle nostre stime, il costo per costruire i 33 GW di off-shore che propone Hutton si trova da qualche parte nella regione dei £40 mld. Potremmo fare lo stesso lavoro a terra per £20 mld'." [57984r]

70 *In un tipico sito urbano dell'Inghilterra, le micro-turbine offrono 0.2 kWh al giorno*. Fonte: *Third Interim Report*, `www.warwickwindtrials.org.uk/2.html`. Tra i migliori risultati nello studio della Warwick Wind Trials c'è il Windsave WS1000 (macchina da 1 kW) montata a Daventry ad una altezza di 15 m dal suolo, che in media genera 0.6 kWh/gg. Ma alcune micro-turbine forniscono solo 0.05 kWh al giorno – Fonte: Donnachadh McCarthy: "Il mio anno senza emissioni di carbonio", *The Independent*, dicembre 2007 [6oc3ja]. La turbina eolica Windsave WS1000, venduta in tutta l'Inghilterra nei negozi B&Q, ha vinto il premio Eco-Bollocks [Eco-ciofeca. (N.d.T.)] da parte dell'autore della *Bibbia dei Costruttori di case*, Mark Brinkley: "Suvvia, è il momento di ammettere che l'industria delle turbine eoliche montate sui tetti è un fiasco completo. Soldi buoni vengono gettati in un'invenzione che non funziona. Questo è il Sinclair C5 degli Anni Zero". [5soql2]. Il Met Office e la Carbon Trust hanno pubblicato una relazione nel luglio 2008 [6g2jm5], dove si stima che, qualora fossero installate turbine su scala ridotta, in tutte le case del Regno Unito, laddove si avesse un riscontro economico, approssimativamente verrebbero generati in totale 0.7 kWh/gg/p. Essi sono dell'avviso che le turbine montate sui tetti in città siano in genere peggio che inutili: "in molte situazioni urbane, le turbine sul tetto non sono in grado di ripagare il carbonio emesso durante la loro produzione, installazione ed esercizio".

– *Le chiatte munite di gru costano £60 mln ciascuna*.
Fonte: `news.bbc.co.uk/1/hi/magazine/7206780.stm`. Ho calcolato che ne occorrerebbero circa 50, assumendo che sarebbero ammessi 60 giorni lavorativi all'anno e che erigere una turbina ne richiederebbe 3.

Per ulteriori approfondimenti: banca dati dell'energia eolica del Regno Unito [`www.bwea.com/ukwed/`].

Figura 10.9. Il parco eolico Kentish Flats. Foto © Elsam (`elsam.com`). Utilizzate dietro permesso.

11 Gadgets

Uno dei maggiori pericoli per la società è il caricabatterie del telefono. La BBC News ci ha messo in guardia su questo sin dal 2005 :

> "Le centrali nucleari saranno tutte spente in pochi anni. Come possiamo mantenere le luci della Gran Bretagna accese? ... **scollegate il caricabatterie del vostro cellulare quando non è in uso**."

Purtroppo, un anno dopo, la Gran Bretagna non aveva recepito il messaggio, e la BBC è stata costretta a segnalare:

> "**i primi in classifica nel campionato britannico dello spreco di energia**."

E come è potuto accadere questo? La BBC pressa, spingendo il messaggio nelle case:

> "il 65% dei consumatori del Regno Unito lascia attaccato il proprio caricabatterie."

Dal modo in cui i giornalisti parlano di questi oggetti neri distruttori del pianeta, è chiaro che essi rappresentano più o meno il male quanto Dart Fener. Ma, esattamente quanto sono malvagi?

In questo capitolo scopriremo la verità sui caricatori. Indagheremo anche sui loro cugini alla sfilata dei gadget: computer, telefoni e televisori. Il decoder. Il modem. In questo capitolo forniremo una stima della potenza impiegata nel loro utilizzo e durante la ricarica, ma non per la fabbricazione di questi giocattoli, per il momento – affronteremo questo nel seguente capitolo, "Roba varia."

Fener

Charger

Figura 11.1. Distruttori di pianeti. Trovate le differenze.

La verità sui caricabatterie

I caricabatterie dei telefoni moderni, quando sono lasciati inseriti, senza telefono attaccato, utilizzano circa mezzo watt. Nelle nostre unità preferite, questo è un consumo di circa 0.01 kWh al giorno. Per tutti coloro la cui pila del consumo supera i 100 kWh al giorno, il consiglio della BBC, *scollegare sempre il caricatore del telefono*, potrebbe ridurre il consumo energetico di un centesimo di un per cento (se solo lo facessero).

Figura 11.2. Questi cinque caricabatterie – tre per cellulari, uno per un PC tascabile ed uno per un computer portatile – hanno fatto registrare meno di un watt sul mio misuratore di potenza.

> *Ogni piccola azione aiuta!*

Non la penso così. Staccare ossessivamente il caricatore del telefono è come cercare di salvare il Titanic con un cucchiaino. Staccatelo pure, ma tenete presente quanto sia piccolo un tale gesto. Mettiamola in questo modo:

Tutta l'energia risparmiata nel tener spento il caricabatterie per un giorno si esaurisce in *un secondo* di guida di un'automobile.

L'energia risparmiata nel tener spento il caricatore per *un anno* è pari all'energia in un singolo bagno caldo.

Certo, alcuni vecchi caricatori utilizzano più di mezzo watt – se sono caldi al tatto, probabilmente stanno utilizzando un watt o addirittura tre (figura 11.3). Un caricabatterie ad alto consumo da tre watt utilizza 0.07 kWh al giorno. Penso che sia una buona idea staccare tali caricabatterie – *salverete* tre sterline l'anno. Ma non illudetevi che, così facendo, avrete "fatto la vostra parte". 3 W è solo una minuscola frazione del consumo totale di energia.

OK, basta salvataggi del Titanic con cucchiaini da tè. Andiamo a scoprire dove si nasconde davvero l'utilizzo dell'elettricità.

Figura 11.3. Questo dispendioso telefono senza fili ed il suo caricabatterie utilizzano 3 W quando vengono lasciati attaccati alla presa. Il che significa **0.07 kWh/gg**. Se il costo dell'energia elettrica ammonta a 10p per kWh, allora uno stillicidio di 3 W viene a costare £3 all'anno.

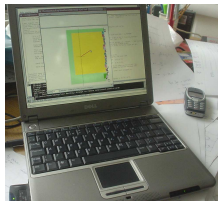
Aggeggi che ciucciano sul serio

La Tabella 11.4 mostra i consumi energetici, in watt, di una casa piena di aggeggi. La prima colonna indica la potenza impiegata quando il dispositivo è effettivamente utilizzato – per esempio, quando un sistema audio sta riproducendo un suono. La seconda colonna indica il consumo quando il dispositivo rimane acceso, ma è lasciato stare senza far nulla. Mi ha particolarmente sorpreso lo scoprire che una stampante laser inattiva impiega 17 W – lo stesso consumo medio di un frigorifero-congelatore! La terza colonna indica il consumo quando all'aggeggio viene esplicitamente chiesto di andarsene a dormire o di rimanere in attesa. La quarta indica il consumo quando è completamente spento – ma lasciato ancora collegato alla corrente. Sto mostrando tutte queste potenze in watt – per una riconversione nelle nostre unità standard, ricordiamo che 40 W valgono quanto 1 kWh/gg. Una bella regola empirica, tra l'altro, è che ogni watt costa circa una sterlina all'anno (ipotizzando un costo dell'elettricità di 10p al kWh).

I più grandi divoratori sono il computer, il suo schermo ed il televisore, i consumi dei quali sono nell'ordine delle centinaia di watt, quando stanno accesi. I sistemi per l'intrattenimento, come gli impianti stereo ed i lettori DVD sciamano nella scia del computer, molti consumando 10 W o giù di lì. Un lettore DVD può costare solo £20 al negozio, ma se lo lasciate sempre acceso, vi costerà altre £10 l'anno. Alcuni impianti stereo e periferiche per computer impiegano diversi watt anche quando sono spenti, grazie ai loro trasformatori principali. Per essere sicuri che un aggeggio sia veramente spento, è necessario disattivarlo alla parete [in Inghilterra la maggior parte delle prese hanno un interruttore associato. (N.d.T.)].

Apparecchio	Potenza impiegata (W)			
	acceso ed attivo	acceso ma non attivo	in standby	spento
Computer fisso e periferiche:				
"la scatola"	80	55		2
schermo a tubo catodico	110		3	0
schermo LCD	34		2	1
proiettore	150		5	
stampante laser	500	17		
modem con & senza fili	9			
Computer portatile	16	9		0.5
Lettore CD portatile	2			
Radiosveglia da comodino	1.1	1		
Radiosveglia da comodino II	1.9	1.4		
Radio digitale	9.1		3	
Radio con mangiacassette	3	1.2		1.2
Amplificatore stereo	6			6
Amplificatore stereo II	13			0
Home-theatre	7	7	4	
Lettore DVD	7	6		
Lettore DVD II	12	10	5	
TV	100		10	
Videoregistratore	13		1	
Decoder per TV digitale	6		5	
Orologio sul forno a microonde	2			
Xbox	160		2.4	
Sony Playstation 3	190		2	
Nintendo Wii	18		2	
Segreteria telefonica		2		
Segreteria telefonica II		3		
Cordless		1.7		
Caricabatterie del cellulare	5	0.5		
Aspirapolvere	1600			

Tabella 11.4. Potenza impiegata da vari aggeggi, espressa in watt. 40 W sono pari ad 1 kWh/gg.



Portatile: 16 W

Computer: 80 W

LCD 31 W

TRC 108 W

Stampante: 17 W (accesa, inattiva)

Proiettore: 150 W

Radio digitale: 8 W

Alimentare i tralci nascosti dell'era dell'informazione

Secondo Jonathan Koomey (2007), negli Stati Uniti server, computer dei centri dati e relativi sistemi ausiliari (condizionamento dell'aria, alimentazione di riserva, e così via) hanno consumato 0.4 kWh al giorno per persona – poco più dell'1% del consumo di elettricità degli Stati Uniti. Questo è il dato relativo ai consumi del 2005, che, tra l'altro, è due volte quello relativo al 2000, in quanto il numero di server è cresciuto da 5.6 a 10 milioni.

Altri aggeggi

Un aspirapolvere, se lo si utilizza per un paio d'ore alla settimana, equivale a circa 0.2 kWh/gg. Falciare il prato significa usare 0.6 kWh. Potremmo andare avanti, ma ho il sospetto che computer e sistemi di intrattenimento siano i grandi polloni del bilancio elettrico della maggior parte delle persone.

Un dato per riassumere questo capitolo: tutto dipenderà da quanti aggeggi avete a casa e al lavoro; ma un ambiente rigoglioso, che sia una casa o un ufficio, straripante di aggeggi lasciati sempre accesi, potrebbe facilmente utilizzare 5 kWh/gg.

False credenze

"Non ha alcun senso che io spenga luci, televisori, e caricabatterie del telefono in inverno. L'energia 'inutile', che buttano fuori, mi riscalda casa, quindi non è sprecata."

Questo mito è *Vero* per poche persone, e solo durante l'inverno; è, invece, *Falso* per la maggior parte.

Se la vostra casa è riscaldata dall'energia elettrica attraverso stufette ordinarie o a ventola, allora sì, è più o meno come se lo fosse mediante qualsiasi apparecchio spreca-elettricità. Ma se vi trovate in questa situazione, sarebbe opportuno cambiaste il modo di riscaldare la vostra casa. L'elettricità è energia di qualità alta, mentre il calore è energia di bassa qualità. *È uno spreco convertire elettricità in calore.* Per la precisione, laddove si abbia una sola unità di calore da un'unità di energia elettrica, lì sta lo spreco. I riscaldatori denominati pompe di calore a sorgente aria-aria o aria-terra possono fare molto meglio, offrendo 3 o 4 unità di calore per ogni unità di energia elettrica consumata. Funzionano come frigoriferi all'incontrario, pompando il calore in casa dall'aria esterna (vedi Capitolo 21).

Del resto, per coloro i quali la propria abitazione è riscaldata con combustibili fossili o biocarburanti, rimane una buona idea evitare l'uso di apparecchi elettrici ed elettronici come fonte di calore per la casa – almeno fino a quando i nostri aumenti della domanda di elettricità saranno serviti da combustibili fossili. È meglio bruciare il combustibile fossile in casa. Il

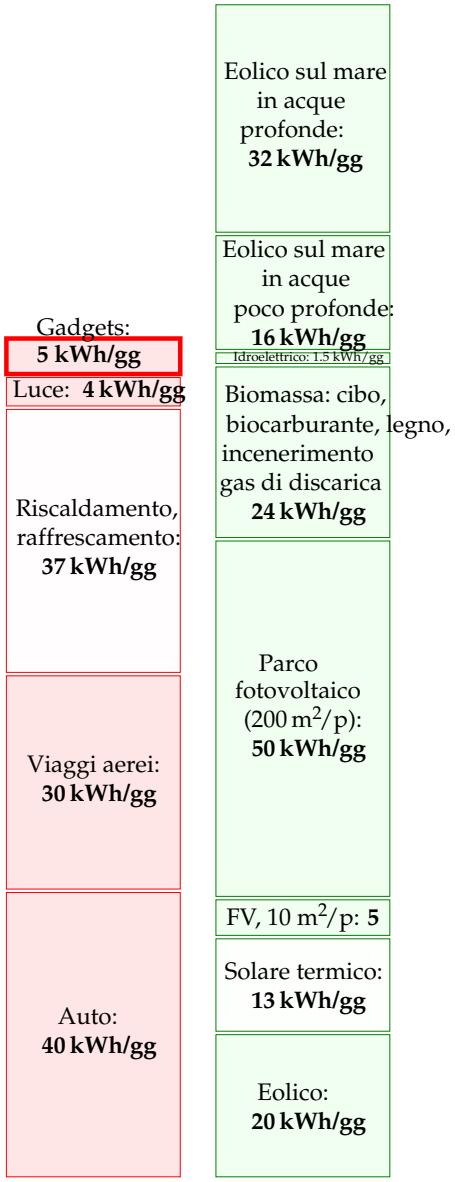


Figura 11.5. Sistemi informatici ed altri aggeggi.

punto è, se si utilizza energia elettrica da una normale centrale termoelettrica, oltre la metà dell'energia se ne va tristemente dal combustibile fossile fin su la torre di raffreddamento. Circa l'8% dell'energia trasformata in elettricità viene persa nel sistema di trasmissione. Se si brucia il combustibile fossile in casa, una maggior quantità di energia andrà direttamente a rendere calda l'aria per voi.

Note ed approfondimenti

p.

75 *La BBC News ci ha messo in guardia . . . scollegate il caricabatterie del cellulare.* L'articolo della BBC News del 2005 dice: "le centrali nucleari saranno tutte spente in pochi anni. Come possiamo mantenere accese le luci della Gran Bretagna? Ecco tre modi per risparmiare energia: spegnere i videoregistratori quando non sono in uso, non lasciare i televisori in stand-by, e staccare il caricabatterie del cellulare quando non è in uso."

75 *I caricabatterie dei telefoni moderni, quando sono lasciati collegati alla presa di corrente con nessun telefono attaccato, utilizzano circa mezzo watt.* Il misuratore di potenza Maplin in figura 11.2 non è sufficientemente accurato per misurare questo tipo di alimentazione. Sono grato a Sven Weier e Richard McMahon del Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Cambridge, i quali hanno misurato un caricabatteria Nokia standard con un calorimetro preciso; essi hanno scoperto che, quando questo non è collegato al cellulare, spreca 0.472 W. Hanno fatto ulteriori misure interessanti: il caricabatterie, quando è collegato a un telefono cellulare completamente carico, spreca 0.845 W e quando sta facendo quel che gli compete, la carica di un cellulare Nokia parzialmente carico, spreca 4.146 W sotto forma di calore. I pedanti a volte chiedono "che dire della *potenza reattiva* del caricabatterie?" Questo è un piccolo inconveniente tecnico, non vale davvero il nostro tempo. Per la cronaca, ho misurato la potenza reattiva (con un misuratore scadente) e l'ho trovata pari a circa 2 VA per caricabatterie. Dato che la perdita di potenza nella rete nazionale è pari all'8% della potenza erogata, mi sa che la perdita di potenza associata alla potenza reattiva è al massimo 0.16 W. Quando a tutti gli effetti nel fare una telefonata il telefono impiega 1 W.

Per ulteriori approfondimenti: Kuehr (2003).

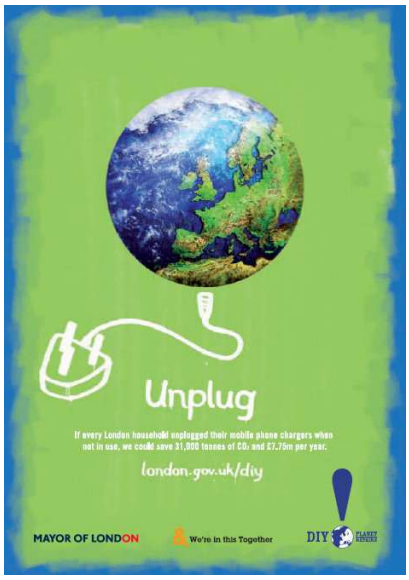


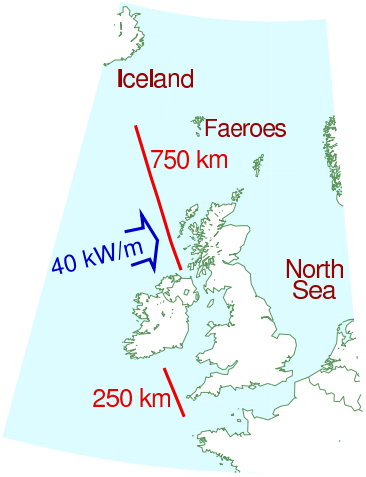
Figura 11.6. Annuncio della campagna "Fai-da-te per riparare il Pianeta". Il testo recita "**Scollegalo**. Se ogni famiglia di Londra scollegasse i caricabatterie dei propri cellulari quando non sono in uso, si potrebbero risparmiare 31 000 tonnellate di CO_2 e £7.75 mln ogni anno." `london.gov.uk/diy/`

12 Onde del mare

Se la potenza delle onde offre speranza ad ogni Paese, allora deve offrirne al Regno Unito ed all'Irlanda – affiancate nell'affacciarsi da un lato sull'Oceano Atlantico e, dall'altro, sul Mare del Nord.

In primo luogo, chiariamo da dove vengono le onde: *il sole fa il vento ed il vento fa le onde*.

La maggior parte della luce solare che colpisce il nostro pianeta va a riscaldare gli oceani. L'acqua riscaldata scalda a sua volta l'aria soprastante, e produce vapore acqueo. L'aria così riscaldata sale e salendo si raffredda; alla fine l'acqua in essa contenuta ricondensa, formando nuvole e pioggia. Al punto d'arrivo più alto, l'aria viene raffreddata ulteriormente dall'oscurità glaciale dello spazio. L'aria divenuta fredda affonda di nuovo. Questa grande pompa ad energia solare spinge l'aria ad avvilupparsi tutta e a rotolare in grandi rulli convettivi. Dal nostro punto di vista, sulla superficie terrestre, questi moti convettivi producono i venti. Il vento è energia solare di seconda mano. Correndo a precipizio sul mare aperto, esso genera le onde. Sicché le onde sono energia solare di terza mano. (Le onde che si infrangono su di una spiaggia non hanno nulla a che vedere con le maree).



In mare aperto, le onde vengono generate ogni volta che la velocità del vento è superiore a circa 0.5 m/s. Le creste d'onda si muovono a circa la velocità del vento che le crea, e nella stessa direzione. La *lunghezza d'onda* delle onde (la distanza tra le creste) ed il *periodo* (il tempo tra una cresta e l'altra) dipendono dalla velocità del vento. Più soffia il vento e più grande è lo specchio acqueo su cui soffia il vento, maggiore è l'*altezza* delle onde accarezzate dal vento. Dunque, dato che i venti prevalenti sull'Atlantico vanno da ovest a est, le onde che arrivano sulla costa atlantica dell'Europa sono spesso particolarmente grandi. (Le onde sulla costa orientale delle isole britanniche sono di solito molto più piccole, pertanto le mie stime del potenziale energetico del moto ondoso si concentreranno sulla risorsa nell'Oceano Atlantico).

Figura 12.1. Un collettore di energia dal moto ondoso, della Pelamis, ossia un serpente di mare composto di quattro sezioni. Esso si dispone con il naso rivolto verso le onde in arrivo. Le onde flettono il serpente e questi movimenti sono contrastati da dei generatori idraulici. La potenza di picco di un tale serpente è pari a 750 kW; nella migliore postazione sull'Atlantico uno di questi serpenti fornirebbe 300 kW in media. Foto di proprietà della Pelamis Wave Power `www.pelamiswave.com`.

Le onde hanno la memoria lunga ed andranno comunque avanti nella stessa direzione per giorni dopo che il vento ha smesso di soffiare, fino a quando si imbatteranno in qualcosa. Nei mari dove la direzione del vento cambia frequentemente, onde nate in giorni diversi formano un miscuglio sovrapposto, viaggiando in direzioni diverse.

Se le onde, viaggiando in una particolare direzione, incontrano determinati oggetti che ne assorbono l'energia – per esempio, una fila di isole con spiagge di sabbia – allora, oltre questo ostacolo, i mari sono più calmi. Gli oggetti gettano un'ombra e nelle onde che da questi provengono vi è meno energia. In questo modo, mentre la luce del sole eroga una potenza per unità di *superficie*, le onde erogano una potenza per unità di *lunghezza* di costa. Non si può avere la botte piena e la moglie ubriaca. Non si può raccogliere l'energia delle onde due miglia al largo *ed anche* un miglio al

largo. O meglio, si può provare, ma l'impianto a due miglia assorbirà dell'energia che sarebbe andata all'impianto ad un miglio, senza che questa sia rimpiazzata. L'energia necessaria per provocare grandi onde il vento la deve recuperare a migliaia di chilometri.

Siamo in grado di trovare un limite superiore alla potenza massima concepibile che si potrebbe ottenere dall'energia del moto ondoso attraverso la stima della potenza in ingresso per unità di lunghezza di litorale esposto, e moltiplicandola per la lunghezza di costa. Ignoriamo la questione di quale meccanismo potrebbe raccogliere tutta questa potenza, e cominciamo col tirar fuori l'ammontare della potenza.

La potenza delle onde dell'Atlantico è stata misurata: si tratta di circa 40 kW per metro di litorale esposto. Sembrerebbe un sacco di energia! Se tutti possedessero un metro di litorale e potessero sfruttare per intero i loro 40 kW, si avrebbe energia in abbondanza, abbastanza da coprire tutti i moderni consumi. Tuttavia, *la nostra popolazione è troppo grande*. Non c'è abbastanza costa rivolta all'Atlantico affinché ciascuno abbia il proprio metro.

Come mostra la mappa a p. 80, la Britannia domina circa 1000 km di costa atlantica (un milione di metri), ossia $^1/_{60}$ m a persona. Quindi la potenza grezza totale in ingresso è 16 kWh al giorno per persona. Se estraessimo tutta questa potenza, l'Atlantico, in riva al mare, sarebbe piatto come lo stagno di un laminatoio. Qualsivoglia sistema pratico non riuscirà ad estrarre tutta la potenza, ed una parte della potenza andrà inevitabilmente persa durante la conversione da energia meccanica ad elettrica. Supponiamo che le macchine ad energia maremotrice più brillanti siano il 50%-efficienti nel trasformare l'energia del moto ondoso in ingresso in elettricità, e di essere in grado di confezionare tali macchine lungo 500 km di costa rivolta verso l'Atlantico. Ciò significa che saremmo in grado di erogare un 25% del relativo valore teorico. Vale a dire 4 kWh al giorno per persona. Come al solito, sto volutamente facendo ipotesi abbastanza estreme, per far crescere la pila verde – mi aspetto che l'idea di poter allineare degli assorbitori di onde lungo *metà della costa atlantica* appaia a molti lettori come balzana.

Come si confrontano i numeri assunti in questo calcolo con la tecnologia odierna? Mentre scrivo, ci sono solo tre macchine ad energia maremotrice che lavorano in acque profonde: tre collettori Pelamis di energia delle onde (figura 12.1) costruiti in Scozia e dispiegati al largo del Portogallo. Risultati concernenti le prestazioni effettive non sono stati resi pubblici, ma i creatori del Pelamis ("progettato con l'obiettivo chiave della sopravvivenza prima ancora dell'efficienza nella cattura di energia") prevedono che un parco-onde lungo due chilometri e composto da 40 dei loro serpenti di mare eroghi 6 kW per metro di parco-onde. Usando questo numero nel precedente calcolo, la potenza erogata da 500 chilometri di parco-onde si riduce a 1.2 kWh al giorno per persona. Mentre l'energia del moto ondoso può risultare utile per piccole comunità nelle isole remote, ho il sospetto che non possa svolgere un ruolo significativo nella soluzione dei problemi

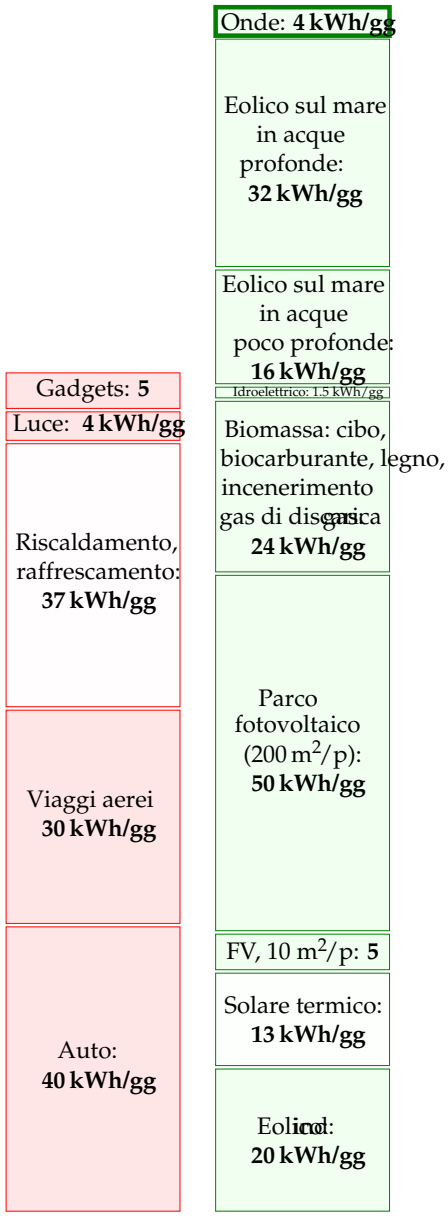


Figura 12.2. Onde.

inerenti l'energia sostenibile della Gran Bretagna. Qual è il peso di un Pelamis, e quanto acciaio contiene? Un serpente con una potenza massima di 750 kW pesa 700 tonnellate, di cui 350 di zavorra. Pertanto le tonnellate di acciaio sono in tutto circa 350. Questo significa un rapporto peso-potenza di circa 500 kg per kW (di picco). Possiamo paragonare questo con l'acciaio richiesto per l'eolico off-shore: una turbina eolica in alto mare, con una potenza massima di 3 MW pesa 500 tonnellate, comprese le fondamenta. Questo è un rapporto peso-potenza di circa 170 kg per kW, un terzo di quello della macchina delle onde. Il Pelamis è un primo prototipo; presumibilmente, con ulteriori investimenti e lo sviluppo della tecnologia delle onde, il rapporto peso-potenza scenderebbe.

Foto di Terry Cavner.

Note ed approfondimenti

p.

80 *Si generano onde quando la velocità del vento supera grosso modo i 0.5 m/s. Le creste d'onda si muovono all'incirca alla velocità del vento che le crea.* La teoria più semplice sulla produzione delle onde (Faber, 1995, p. 337) suggerisce che (per onde piccole) le creste si muovono a circa la metà della velocità del vento che le crea. Si trova empiricamente, però, che più a lungo il vento soffia, più è grande la lunghezza d'onda delle onde dominanti presenti e maggiore è la loro velocità. La velocità caratteristica nei mari completamente formati è quasi esattamente pari alla velocità del vento a 20 metri sopra la superficie delle acque (Mollison, 1986).

– *Le onde sulla costa orientale delle isole britanniche sono di solito molto più piccole.*

Mentre la potenza del moto ondoso a Lewis (Atlantico) è di 42 kW/m, quelle nei siti della costa orientale sono: Peterhead, 4 kW/m; Scarborough, 8 kW/m; Cromer, 5 kW/m. Fonte: Sinden (2005). Sinden dice: "Nella regione del Mare del Nord si sperimenta un ambiente caratterizzato da energie del moto ondoso molto basse".

81 *La potenza del moto ondoso atlantico è di 40 kW per metro di costa esposta.*
(Il Capitolo F spiega come possiamo stimare questa potenza utilizzando alcuni dati di fatto circa le onde). Questo numero ha una solida base nella letteratura concernente la potenza del moto ondoso dell'Atlantico (Mollison et al., 1976; Mollison, 1986, 1991). Da Mollison (1986), ad esempio: "la risorsa su larga scala del Nord-Est Atlantico, dall'Islanda al Nord del Portogallo, è al netto pari a 40–50 MW/km, di cui 20–30 MW/km sono potenzialmente economicamente estraibili". In qualsiasi punto in mare aperto, si possono distinguere tre potenze per unità di lunghezza: la potenza totale che passa per quel punto in tutte le direzioni (63 kW/m, in media, per le isole Scilly e 67 kW/m al largo di Uist); la potenza netta intercettata da un dispositivo di raccolta direzionale, orientato nella direzione ottimale (47 kW/m e 45 kW/m rispettivamente); e la potenza per unità di costa, che tiene conto del disallineamento tra l'orientamento ottimale di un collettore direzionale e la costa (per esempio in Portogallo, l'orientamento ottimale è fronte nord-ovest, mentre la costa si affaccia ad ovest).

– *Nella pratica qualsiasi sistema non riuscirà ad estrarre tutta la potenza, ed una parte verrà inevitabilmente persa durante la conversione da energia meccanica ad elettrica.* La prima macchina ad energia maremotrice connessa alla rete nel Regno Unito, la Patella di Islay, fornisce un esempio lampante di tali perdite. Quando è stata progettata, la sua efficienza di conversione energetica dal moto ondoso alla rete elettrica è stata stimata essere del 48%, mentre la potenza media è stata prevista essere pari a 200 kW. Tuttavia, le perdite nel sistema di cattura, nei volani e nei componenti elettrici comportano una produzione media effettiva di 21 kW – solo il 10% dell'uscita prevista (Wavegen, 2002).

13 Cibo e fattorie

L'agricoltura moderna è l'uso del terreno per convertire il petrolio in cibo.

Albert Bartlett

Figura 13.1. Un'insalata Niçoise.

Minima energia: **3kWh/gg**

Figura 13.2. Requisiti minimi energetici di una persona.

Abbiamo già discusso nel Capitolo 6 quanta potenza sostenibile potrebbe essere *prodotta* attraverso la verzura, in questo capitolo vedremo quanta potenza viene attualmente *consumata* nel darci il nostro pane quotidiano.

Una persona moderatamente attiva con un peso di 65 kg consuma cibo con un contenuto di energia chimica di circa 2600 "Calorie" al giorno. Una "Caloria", nei circoli dei dietologi, è in realtà quello che per i chimici sono 1000 calorie (1 kcal). 2600 "Calorie" al giorno sono circa 3 kWh al giorno. La maggior parte di questa energia alla fine fuoriesce dal corpo sotto forma di calore, quindi una delle funzioni di una tipica persona è quella di agire come un termosifone con un'uscita pari a poco più di 100 W, una lampadina di media potenza. Mettete 10 persone in una piccola stanza fredda, e potrete spegnere il riscaldamento a convezione da 1 kW.

Quanta energia consumiamo a tutti gli effetti, per ottenere i nostri 3 kWh al giorno? Se allarghiamo il nostro punto di vista per includere gli inevitabili costi a monte inerenti la produzione del cibo, scopriremo allora che la nostra impronta energetica è sostanzialmente più grande. Dipende se siamo vegani, vegetariani o carnivori.

Il vegano ha la più piccola impronta inevitabile: 3 kWh al giorno di energia dalle piante che si mangia.

Il costo energetico del bere latte

Io amo il latte. Se sono un bevitore da una pinta di latte al giorno, quanta energia sto richiedendo? Una tipica mucca da latte produce 16 litri di latte al giorno. Quindi, la mia pinta al giorno (mezzo litro al giorno), richiede che io impieghi $^1/_{32}$ di una mucca. Oh, aspettate – io amo troppo il formaggio. E per fare 1 kg di Cheddar irlandese occorrono circa 9 kg di latte. Pertanto, consumare 50 g di formaggio al giorno richiede la produzione di ulteriori 450 g di latte. OK: le mie abitudini riguardo a latte e formaggio richiedono che io impieghi $^1/_{16}$ di mucca. E quanta energia ci vuole per far funzionare una mucca? Beh, se una mucca che pesa 450 kg ha requisiti energetici al chilo simili a quelli di un essere umano (che ogni 65 kg brucia 3 kWh al giorno), allora la mucca deve necessariamente utilizzare circa 21 kWh/gg. Questa estrapolazione da umano a bovino vi mette a disagio? Diamo un'occhiata a questi numeri: `www.dairyaustralia.com.au` dice che una mucca da latte del peso di 450 kg ha bisogno di 85 MJ/gg, che sono 24 kWh/gg. Grande, ci siamo andati davvero vicino! Quindi la mia quota di $^1/_{16}$ di mucca equivale ad un consumo energetico di circa 1.5 kWh al

giorno. Questa cifra non tiene conto di altri costi energetici coinvolti nel persuadere la mucca a fare il latte ed il latte a trasformarsi in formaggio, e nell'ottenere che latte e formaggio viaggino da lei a me. Parleremo di alcuni di questi costi allorché discuteremo di trasporto merci e di supermercati nel Capitolo 15.

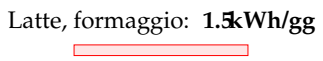


Figura 13.3. Latte e formaggio.

Uova

Una "ovaiola" (una gallina che depone uova) mangia circa 110 g di mangime al giorno. Supponendo che i mangimi per i polli abbiano un contenuto di energia metabolizzabile pari a 3.3 kWh per kg, si ha un consumo di 0.4 kWh al giorno per gallina. Le ovaiole producono in media 290 uova all'anno. Dunque, mangiare due uova al giorno richiede una potenza di 1 kWh al giorno. Ogni uovo in sé contiene 80 kcal, che sono circa 0.1 kWh. Pertanto, da un punto di vista energetico, la produzione di uova è il 20% efficiente.

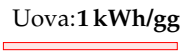


Figura 13.4. Due uova al giorno.

Il costo energetico del mangiare carne

Diciamo che un mangiatore di carne entusiasta ne mangia circa due etti e mezzo al giorno (250 g). (Questo è il consumo di carne medio degli Americani). Per calcolare la potenza necessaria al mantenimento degli animali del mangiatore di carne, man mano che maturano ed in attesa della braciola, abbiamo bisogno di sapere per quanto tempo gli animali se ne stanno in giro a consumare energia. Pollo, maiale o manzo?

Pollo, signore? Ogni pollo che vi mangiate è stato un pollo che se ne andava chiocciando in giro per circa 50 giorni. In questo modo il consumo costante di 2.5 hg di pollo al giorno richiede circa 12.5 kg di pollo vivo [rapporto 1 a 50. (N.d.T.)], in preparazione per essere mangiato. E quei dodici chili e mezzo di pollo consumano energia.

Suino, signora? I maiali rimangono in giro più a lungo – forse 400 giorni dalla nascita alla pancetta – di modo che il consumo costante di 2.5 hg al giorno di carne di maiale richiede circa 100 kg di suino vivo [rapporto 1 a 400. (N.d.T.)], in preparazione per essere mangiato.

Manzo? La produzione di carne bovina comporta tempi di consegna più lunghi. Ci vogliono circa 1000 giorni di mucca-tempo per creare una bistecca. In questo modo il consumo costante di 2.5 hg al giorno di carne di manzo richiede circa 250 kg di manzo vivo [rapporto 1 a 1000. (N.d.T.)], in preparazione per essere mangiato.

Per condensare tutte queste idee in un unico numero, supponiamo di mangiare due etti e mezzo (250 g) al giorno di carne, composta in parti uguali di pollo, maiale e manzo. Siffatta abitudine carnivora richiede il sostentamento perpetuo di 4 kg di carne di pollo, 33 kg di carne di suino e 83 kg di carne di bovino. Ciò significa all'incirca un totale di 120 kg di carne, ossia 180 kg di animale (dal momento che dell'animale circa due terzi

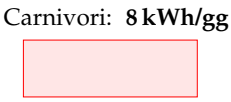


Figura 13.5. Mangiare carne richiede potenza extra, giacché si deve alimentare la sfilza di animali in attesa di essere mangiati dagli umani.

si trasformano in carne). E se i 180 kg di animale hanno requisiti energetici simili ad un essere umano (per il quale 65 kg bruciano 3 kWh/gg), allora la potenza necessaria per alimentare le nostre abitudini in fatto di carne è

$$180\,\text{kg} \times \frac{3\,\text{kWh/gg}}{65\,\text{kg}} \simeq 8\,\text{kWh}/gg.$$

Mi sono preso di nuovo la libertà fisiologica di assumere che "gli animali sono come gli esseri umani" una stima più accurata dell'energia coinvolta nella produzione del pollo si trova nelle note di chiusura di questo capitolo. A prescindere da questo, io voglio solo una stima approssimativa, ed eccola qui: la potenza necessaria per produrre il cibo per un tipico consumatore di verdure, latticini, uova e carne è $1.5 + 1.5 + 1 + 8 = 12\,\text{kWh}$ al giorno. (Il bilancio delle calorie giornaliere di questa dieta grezza consiste in 1.5 kWh dalle verdure; 0.7 kWh dai latticini; 0.2 kWh dalle uova; 0.5 kWh dalla carne – per un totale di 2.9 kWh al giorno).

Figura 13.6. Ecco chi raccoglierà le colture energetiche per farne cibo.

Questo numero non include i costi energetici associati all'esercizio dell'attività agricola, ai fertilizzanti, alla trasformazione, alla refrigerazione ed al trasporto del cibo. Valuteremo alcuni di tali costi qui sotto, ed un po' nel Capitolo 15.

Questi calcoli costituiscono un argomento a favore del vegetarianesimo, a causa del minor consumo di energia? Dipende da dove gli animali si nutrono. Prendete le ripide colline e le montagne del Galles, per esempio. La terra potrebbe essere utilizzata per qualcosa di diverso dal pascolo? Entrambi questi pascoli rocciosi o vengono utilizzati per sostenere le pecore, oppure non sono di aiuto per l'alimentazione degli esseri umani. Si può pensare a questi verdi pendii naturali come a piantagioni di biocarburanti esenti da manutenzione ed alle pecore come a macchine raccoglibiocarburante, autoreplicanti ed automatizzate. La perdita di energia dalla luce del sole alla carne di montone è sostanziale, ma probabilmente non v'è modo migliore di catturare l'energia solare in siffatti luoghi. (Non sono sicuro che questo argomento per la pastorizia in Galles sia, in realtà, quantificabile: quando il tempo peggiora, le pecore gallesi vengono spostate nei campi più in basso dove la loro dieta è integrata con mangimi di soia ed altri alimenti prodotti con l'aiuto di fertilizzanti ad alta intensità energetica, quale sia il vero costo energetico lo ignoro). Argomentazioni simili possono essere fatte a favore della carnivorosità riguardo a luoghi come le boscaglie dell'Africa e le praterie dell'Australia, e a favore del consumo di prodotti lattiero-caseari in India, dove milioni di mucche sono alimentate con sottoprodotti della coltivazione di riso e mais. D'altra parte, laddove gli animali sono allevati in gabbie e nutriti di grano che gli esseri umani potrebbero mangiare, non v'è dubbio che sarebbe più efficiente in termini energetici tagliare i viveri a chiocce o scrofe, e nutrire direttamente con il grano gli esseri umani.

Fertilizzanti e altri costi energetici nel settore agricolo

In Europa l'energia incorporata nei fertilizzanti è all'incirca 2 kWh al giorno per persona. Secondo un rapporto dell'Università di Warwick al DEFRA [Dipartimento dell'Ambiente, dell'Alimentazione e degli Affari Rurali. (N.d.T.)], l'agricoltura nel Regno Unito nel 2005 ha usato un'energia di 0.9 kWh al giorno per persona, per quanto concerne mezzi agricoli, macchinari, riscaldamento (nello specifico delle serre), illuminazione, areazione e refrigerazione.

Il costo energetico di Enigma, Fido ed Ombromanto

Ah, gli animali da compagnia! Siete i servitori di un cane, un gatto o un cavallo?

Ci sono forse 8 milioni di gatti in Gran Bretagna. Supponiamo che badiate ad uno di loro. Il costo energetico di Enigma? Se lei mangia 50 g di carne al giorno (pollo, maiale e manzo), allora il calcolo dell'ultima sezione vi dice che la potenza necessaria per fornire il cibo ad Enigma è poco meno di 2 kWh al giorno. Un gatto vegetariano ne richiederebbe di meno.

Allo stesso modo, se il vostro cane Fido mangia 200 g di carne al giorno, e carboidrati 1 kWh al giorno, allora la potenza richiesta per produrre il suo nutrimento è grosso modo 9 kWh al giorno.

Ombromanto, il cavallo, pesa all'incirca 400 kg e consuma 17 kWh al giorno.

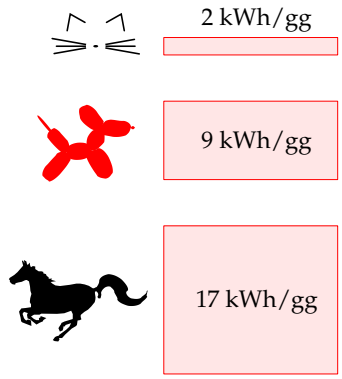


Figura 13.7. Potenza necessaria per alimentare gli animali da compagnia.

False credenze

Ho sentito dire chel'impronta energetica del cibo è così grande che "è meglio girare in auto che a piedi".

Che sia vero o no dipende dalla vostra dieta. È certamente possibile trovare cibo la cui impronta energetica in termini di combustibile fossile è maggiore dell'energia fornita agli umani. Un sacchetto di patatine, per esempio, ha un'energia incorporata di 1.4 kWh di combustibile fossile per ogni kWh di energia chimica mangiata. L'energia incorporata nella carne è più alta. Secondo uno studio dell'Università di Exeter, la dieta tipo presenta un'energia incorporata di circa 6 kWh per ogni kWh consumato. Per capire se usa meno energia chi è alla guida di un'auto o chi cammina, abbiamo bisogno di conoscere l'efficienza di ciascuna modalità di trasporto. Per l'auto media del Capitolo 3, il costo energetico è di 80 kWh ogni 100 km. Camminando si utilizza un'energia netta di 3.6 kWh per 100 km – 22 volte di meno. Dunque, se si vive interamente basando la propria alimentazione su di un'impronta che supera i 22 kWh per ogni kWh, allora sì che il costo energetico dell'andare da A a B con un veicolo alimentato a combustibili fossili è inferiore a quello dell'andarci sulle proprie gambe. Ma qualora si segua una dieta tipica (6 kWh per ogni kWh), il detto "è

meglio guidare che camminare" diviene una falsa credenza. Camminando si consuma quattro volte di meno.

Note ed approfondimenti

p.

83 *Una tipica mucca da latte ne produce 16 litri al giorno.* Ci sono 2.3 milioni di mucche da latte nel Regno Unito, ognuna produce attorno a 5900 litri all'anno. La metà dell'intero prodotto viene venduta come latte liquido. `www.ukagriculture.com`, `www.vegsoc.org/info/cattle.html`

84 *Occorrono circa 1000 giorni di mucca-tempo per creare una bistecca.* 33 mesi dal concepimento al mattatoio: 9 mesi di gestazione e 24 mesi di allevamento. `www.shabdenparkfarm.com/farming/cattle.htm`

– *Pollo.* Una gallina ovaiola completamente sviluppata (20 settimane di età) pesa tra 1.5 e 1.6 kg. La sua alimentazione ha un contenuto energetico di 2850 kcal per kg, vale a dire 3.3 kWh per kg, ed il suo consumo alimentare aumenta fino a 340 g per settimana, a partire dalla sesta settimana di vita, e di 500 g per settimana, se invecchia 20 settimane. Una volta che depone, la richiesta tipica di mangime è di 110 g al giorno.
L'alimentazione dei polli da carne ha un contenuto energetico di 3.7 kWh al kg. Il consumo di energia è 400–450 kcal al giorno per pollo (0.5 kWh/gg a pollo), per un animale tipo con un peso di 2 kg. Un pollo da carne per arrivare a pesare 2.95 kg consuma un totale di 5.32 kg di mangime [`5h69fm`]. Pertanto l'energia incorporata nella carne di pollo è pari a circa 6.7 kWh per kg di animale, ossia 10 kWh per kg di carne mangiata. Se avessi usato questo numero invece della mia stima a occhio e croce, il contributo energetico del pollo sarebbe balzato un po' più in alto. Ma dato che l'impronta energetica di una dieta di carne mista è dominata da quella di manzo, davvero non ha importanza che io abbia sottovalutato i polli. Fonti: Subcommittee on Poultry Nutrition, National Research Council (1994), `www.nap.edu/openbook.php?isbn=0309048923`, MacDonald (2008), e `www.statistics.gov.uk/statbase/datasets2.asp`.

– *Fate conto di mangiare due etti e mezzo al giorno di carne, fatta di uguali quantità di pollo, maiale e manzo.* Questo si avvicina molto al consumo medio di carne in America, che è di 251 g al giorno – composti da 108 g di pollo, 81 g di manzo e 62 g di maiale (MacDonald, 2008).

86 *L'energia incorporata nei fertilizzanti in Europa è di circa 2 kWh al giorno per persona.* Nel 1998–9, l'Europa Occidentale ha utilizzato 17.6 Mt all'anno di fertilizzanti: 10 Mt di nitrati, 3.5 Mt di fosfato e 4.1 Mt di potassa. Questi fertilizzanti hanno impronte energetiche di 21.7, 4.9 e 3.8 kWh al kg rispettivamente. Condividendo tale energia tra 375 milioni di persone, si trova un'impronta complessiva di 1.8 kWh al giorno per persona. Fonti: Gellings and Parmenter (2004), International Fertilizer Industry Association [`5pwojp`].

– *L'agricoltura nel Regno Unito ha usato nel 2005 un'energia di 0.9 kWh al giorno per persona.* Fonte: Warwick HRI (2007).

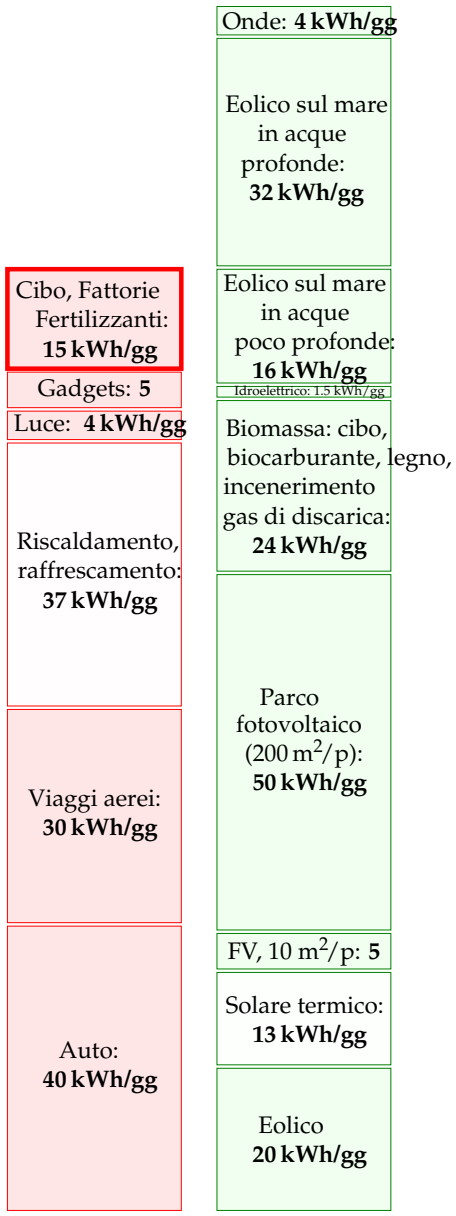


Figura 13.8. Cibo e fattorie.

– *Un sacchetto di patatine ha un'energia incorporata di 1.4 kWh di combustibile fossile per ogni kWh di energia chimica mangiata*. Ho stimato questa energia a partire dall'impronta ecologica di un sacchetto di patatine: 75 g CO_2 per un pacchetto standard da 35 g [5bj8k3]. Di questa impronta, il 44% è associato all'esercizio dell'attività agricola, il 30% all'elaborazione, il 15% al confezionamento e l'11% a trasporto e smaltimento. L'energia chimica fornita al consumatore è 770 kJ. Così questo alimento ha un'impronta di carbonio di 350 g per kWh. Assumendo che la maggior parte di tale impronta provenga da combustibili fossili ad un ritmo di 250 g CO_2 per kWh, l'impronta energetica delle patatine è di 1.4 kWh di combustibile fossile per ogni kWh di energia chimica mangiata.

86 *La dieta tipica incorpora un'energia di circa 6 kWh per ogni kWh consumato*. Coley (2001) stima che l'energia incorporata in una dieta tipica è 5.75 volte quella che ne deriva. Camminare ha un'impronta di CO_2 pari a 42 g/km; andare in bicicletta, 30 g/km. Per confronto, guidare una vettura nella media comporta l'emissione di 183 g/km.

– *Andare a piedi comporta l'utilizzo di 3.6 kWh ogni 100 km*. Un essere umano che cammina utilizza un totale di 6.6 kWh ogni 100 km [3s576h]; per ottenere l'impronta energetica dell'andare a piedi si sottrae l'energia a riposo [richiesta dal metabolismo basale. (N.d.T.)] (Coley, 2001).

Per ulteriori approfondimenti: Weber and Matthews (2008).

14 Maree

La luna e la terra sono in un turbinio, piroettando danzano intorno al sole. Insieme fanno un giro intorno al sole una volta ogni anno; allo stesso tempo volteggiano una intorno all'altra, una volta ogni 28 giorni. La luna gira altresì intorno a se stessa una volta ogni 28 giorni, di modo che mostra sempre la stessa faccia alla sua compagna di ballo, la terra. Quella prima donna della terra non restituisce il complimento: lei piroetta una volta al giorno. Questa danza è tenuta insieme dalla forza di gravità: ogni pezzo di terra, luna e sole è tirato verso ogni altro pezzo di terra, luna e sole. La somma di tutte queste forze è *quasi* esattamente ciò che è necessario per mantenere la danza vorticosa in corso. Ma esistono squilibri molto lievi tra le forze gravitazionali e le forze necessarie al mantenimento della danza. Sono questi squilibri a dare origine alle maree.

Gli squilibri connessi con il turbinare della luna e della terra l'una intorno all'altra sono circa tre volte più grandi degli squilibri associati alla lenta danza della terra intorno al sole; quindi, la dimensione delle maree varia a seconda della fase della luna, al passare della luna e del sole dentro e fuori l'allineamento. Con la luna piena e la luna nuova (quando luna e sole sono in linea l'una con l'altro) gli squilibri si rafforzano a vicenda, e le conseguenti grandi maree sono chiamate *maree equinoziali*. (Le maree equinoziali *non* sono "maree che si verificano durante gli equinozi"; tali maree [più propriamente dette sigiziali/sizigiali – in inglese 'spring tides', da cui il diverso gioco di parole con 'primavera' anziché 'equinozio'. (N.d.T.)] avvengono ogni due settimane, puntuali come un orologio svizzero). Negli intermedi delle mezze lune, gli squilibri in parte si annullano e le maree sono più piccole; queste maree più piccole sono chiamate *maree di quadratura*. Le maree equinoziali hanno circa due volte l'ampiezza delle maree di quadratura: le alte maree equinoziali sono due volte più alte sul livello del mare delle alte maree di quadratura, le basse maree equinoziali sono il doppio più basse delle basse maree di quadratura e le correnti di marea sono due volte più grandi per le sigiziali che per quelle di quadratura.

Perché ci sono due alte maree e due basse maree al giorno? Beh, se la terra fosse una sfera perfetta, una palla da biliardo liscia, ricoperta dagli oceani, l'effetto marea del turbinio terra-luna sarebbe quello di deformare l'insieme delle acque leggermente verso e lontano dalla luna, dandogli un po' la forma di una palla da rugby (figura 14.1). Qualcuno che vivesse sull'equatore di questa terra "a palla da biliardo", girerebbe in tondo una volta al giorno entro il bozzolo d'acqua, e noterebbe il livello dell'acqua che va su e giù due volte al giorno: su, mentre passa sotto il "naso" della palla da rugby, giù, mentre passa sotto la "coda". Questa spiegazione un po' in stile cartone animato si discosta abbastanza dalla realtà. Nella realtà, la terra non è liscia e non è uniformemente coperta dall'acqua (come avrete notato). Due gobbe d'acqua non possono sfrecciare sibilando intorno alla

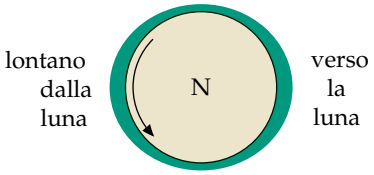


Figura 14.1. Un oceano copre una terra a forma di palla da biliardo. Stiamo guardando in basso posizionati sul Polo Nord, e la luna si trova a 60 cm a destra della pagina. La terra gira una volta al giorno all'interno di un guscio d'acqua a forma di palla da rugby. Gli oceani sono allungati verso e lontano dalla luna, perché la forza gravitazionale fornita dalla luna non corrisponde perfettamente alla forza centripeta necessaria per mantenere la terra e la luna nella rotazione attorno al loro comune centro di gravità. Chiunque si ponga in piedi sull'equatore (che ruota come indicato dalla freccia) sperimenterà due alte maree e due basse maree al giorno.

terra una volta al giorno, dato che ci sono i continenti ad intralciarle. Il vero comportamento delle maree è, dunque, più complicato. In una grande massa d'acqua, come l'Oceano Atlantico, si formano sì creste e ventri di marea, ma essendo impossibilitati a frusciare tutto intorno al globo terrestre, fanno del loro meglio, ovvero sfrecciano sibilando lungo il perimetro dell'Oceano. Nel Nord Atlantico vi sono due creste e due ventri, che fanno il giro dell'Atlantico in senso antiorario una volta al giorno. Qui in Gran Bretagna non si vedono direttamente queste creste e saccature atlantiche – siamo in posizione arretrata rispetto a quello che si può propriamente dire Oceano Atlantico, separati da qualche centinaio di chilometri di piscina per bambini chiamata piattaforma continentale. Ogni volta che una delle creste ci sfreccia davanti provenendo dall'Atlantico vero e proprio, una cresta viene inviata alla nostra piscina per bambini. Allo stesso modo ogni saccatura atlantica ci manda un ventre di marea. Creste e ventri consecutivi sono separati da sei ore. O, per essere più precisi, da sei ore e un quarto, dal momento che il tempo tra un sorgere della luna e l'altro è di circa 25 ore, non 24.

La velocità alla quale viaggiano creste e ventri varia a seconda della profondità della piscina per bambini. Quanto più è bassa la piscina per bambini, tanto più è lento e lungo il viaggio delle creste e dei ventri. In mezzo al mare, le maree raggiungono solo un piede o due in altezza. All'arrivo, negli estuari europei, l'escursione della marea è spesso pari a quattro metri. Nell'emisfero settentrionale, la forza di Coriolis (una forza, associata alla rotazione della terra, che agisce solo su oggetti in movimento) porta tutte le creste e i ventri delle maree ad abbracciare la riva destra, nel loro procedere. Ad esempio, le maree nel Canale della Manica sono più grandi sul lato francese. Allo stesso modo, le creste e i ventri che entrano nel Mare del Nord intorno alle Orcadi abbracciano la parte britannica, dirette verso l'estuario del Tamigi; svoltano, poi, a sinistra in Olanda per rendere omaggio alla Danimarca.

L'energia delle maree è talvolta chiamata energia lunare, visto che è soprattutto grazie alla luna che l'acqua viene portata in giro in questo modo. Gran parte dell'energia delle maree, tuttavia, in realtà proviene dall'energia di rotazione della trottola-terra. La terra sta rallentando, gradualmente, molto gradualmente.

Dunque, come possiamo mettere in uso l'energia delle maree, e a quanto ammonta l'energia estraibile?

Stime approssimative della potenza mareomotrice

Quando si pensa alla potenza delle maree, si potrebbe considerare un bacino artificiale in riva al mare, con una ruota idraulica che viene attivata allorché il bacino si riempie o si svuota (Figure 14.2 e 14.3). Il Capitolo Tecnico G mostra come stimare la potenza disponibile da tali bacini per le maree. Ipotizzando un'escursione di 4 m, tipica di molti estuari europei, la

Figura 14.2. Bacino e mulino di Woodbridge. Foto per gentile concessione di Ted Evans.

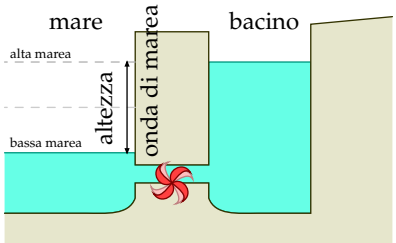


Figura 14.3. Un bacino artificiale per le maree. Il bacino è stato riempito con l'alta marea, e ora c'è bassa marea. Rilasciando l'acqua attraverso il generatore di elettricità si trasforma l'energia potenziale dell'acqua in energia elettrica.

escursione di marea	densità di potenza
2 m	1 W/m^2
4 m	**3** W/m^2
6 m	7 W/m^2
8 m	13 W/m^2

Tabella 14.4. Densità di potenza (potenza per unità di superficie) dei bacini per le maree, assumendo che si abbia generazione sia dalla marea montante che da quella discendente.

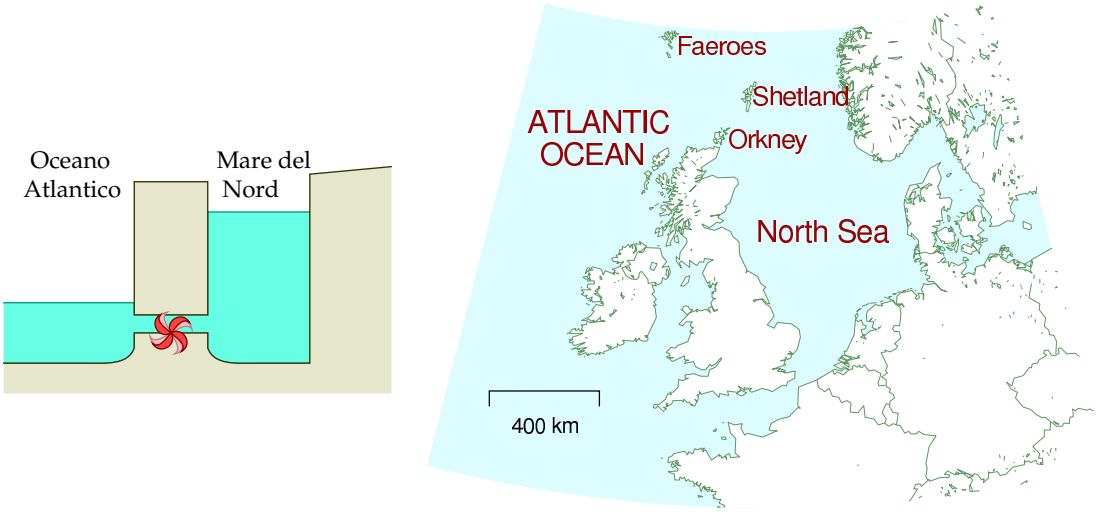


Figura 14.5. Le Isole Britanniche sono in una posizione fortunata: il Mare del Nord forma un bacino per le maree naturale, dentro e fuori la quale l'acqua si riversa copiosa due volte al giorno.

potenza massima di un bacino artificiale, che viene riempito rapidamente con l'alta marea e rapidamente svuotato con la bassa marea e che genera energia da entrambe le direzioni di flusso, è di circa $3\,\mathrm{W/m^2}$. Questa è la stessa potenza per unità di superficie di un parco eolico off-shore. E sappiamo già quanto grandi devono essere i parchi eolici off-shore per fare la differenza. *Debbono assumere le dimensioni di Paesi.* Allo stesso modo, affinché i bacini per le maree siano resi in grado di produrre una potenza paragonabile al consumo totale della Gran Bretagna, sarebbe necessario che l'area totale di tali bacini fosse simile alla superficie della Gran Bretagna.

Sorprendentemente, la Gran Bretagna è già dotata di un bacino naturale, che ha giusto le dimensioni richieste. Questo bacino per le maree è conosciuto come Mare del Nord (figura 14.5). Se semplicemente inseriamo dei generatori nei punti opportuni, può essere estratta una potenza significativa. I generatori potrebbero assomigliare a "mulini a vento subacquei". Poiché la densità dell'acqua è circa 1000 volte quella dell'aria, la potenza del flusso idrico è 1000 volte maggiore della forza del vento alla stessa velocità. Torneremo alle centrali mareomotrici in un attimo, ma prima cerchiamo di discutere di quanta energia grosso modo viaggi con le maree attorno alla Gran Bretagna ogni giorno.

Potenza grezza delle maree in entrata

Le maree in Gran Bretagna sono autentiche "onde di marea" – da non confondersi con gli tsunami, che pur essendo onde anomale, ossia fuori dalla norma, non hanno niente a che fare con le maree. Il momento dell'alta marea si sposta progressivamente nel tempo, ovvero arriva più tardi, man mano che ci si sposta verso Est, lungo la Manica, dalle Isole Scilly a

Portsmouth e su fino a Dover. La cresta dell'onda di marea avanza lungo il canale a circa 70 km/h. (La cresta dell'onda si muove molto più velocemente di quanto faccia l'acqua stessa, proprio come per le onde ordinarie sul mare). Analogamente, l'alta marea si muove in senso orario intorno alla Scozia, viaggiando giù per il Mare del Nord da Wick a Berwick e verso Hull ad una velocità di circa 100 km/h. Queste due alte maree convergono sull'estuario del Tamigi. Per coincidenza, la cresta scozzese arriva circa 12 ore più tardi della cresta che proviene da Dover; giunge così quasi in sincronia con la seguente bassa marea via Dover e Londra riceve le sue normali due alte maree al giorno.

La potenza che possiamo estrarre dalla maree non potrà mai essere superiore alla potenza totale di tali onde di marea dall'Atlantico. È stata misurata la potenza totale che attraversa le linee in figura 14.6; in media, essa ammonta a 100 kWh al giorno per persona. Se immaginiamo di estrarre il 10% di questa energia incidente, e se i processi di conversione e trasmissione fossero il 50% efficienti, la potenza media fornita sarebbe pari a 5 kWh al giorno per persona.

Ora cerchiamo di stimare la potenza che potrebbe essere erogata da tre soluzioni specifiche: parchi mareomotori, sbarramenti e lagune per maree in mare aperto.

Figura 14.6. La potenza media in ingresso relativa alle onde di marea lunare che attraversano queste due linee è stata misurata essere pari a 250 GW. Questa potenza grezza, ripartita fra 60 milioni di persone, equivale a 100 kWh al giorno per persona.

Parchi per il flusso delle maree

Un modo per estrarre energia dalle maree potrebbe essere quello di costruire parchi mareomotori, proprio come i parchi eolici. Il primo "mulino a vento subacqueo", o meglio generatore a flusso di marea, ad essere collegato alla rete è stata una turbina da 300 kW, installata nel 2003 nei pressi della città settentrionale di Hammerfest in Norvegia. Risultati inerenti la produzione di energia in dettaglio non sono stati pubblicati, e nessuno ha ancora costruito un impianto mareomotore con più di una turbina, di modo che andremo a fare affidamento sulla fisica e sulle congetture al fine di predire quanta potenza i parchi marini con centrali mareomotrici potrebbero produrre. Supponendo che le regole sensate per la posa di un parco mareomotore siano simili a quelle per i parchi eolici e che l'efficienza delle turbine mareomotrici sia pari a quella delle migliori turbine eoliche, la Tabella 14.7 mostra la potenza di un impianto mareomotore in funzione di alcune correnti di marea.

velocità (m/s)	(nodi)	densità di potenza (W/m^2)
0.5	1	1
1	2	8
2	4	60
3	6	200
4	8	500
5	10	1000

Tabella 14.7. Densità di potenza dei parchi mareomotori (in watt per metro quadro di fondale marino) in funzione della velocità del flusso. (1 nodo = 1 miglio nautico all'ora = 0.514 m/s.)

Dato che le correnti di marea dai 2 ai 3 nodi sono comuni, ci sono molti posti in giro per le Isole Britanniche, dove la potenza per unità di superficie di parco mareomotore sarebbe 6 W/m^2 o di più. Questa potenza per unità di superficie è paragonabile alle nostre stime per i parchi eolici (2–3 W/m^2) e per i parchi solari fotovoltaici (5–10 W/m^2).

La potenza delle maree non è da buttar via! Come si somma il tutto, assumendo che non vi siano ostacoli di ordine economico allo sfruttamento dell'energia delle maree presso tutti i punti caldi dell'intero Regno Unito?

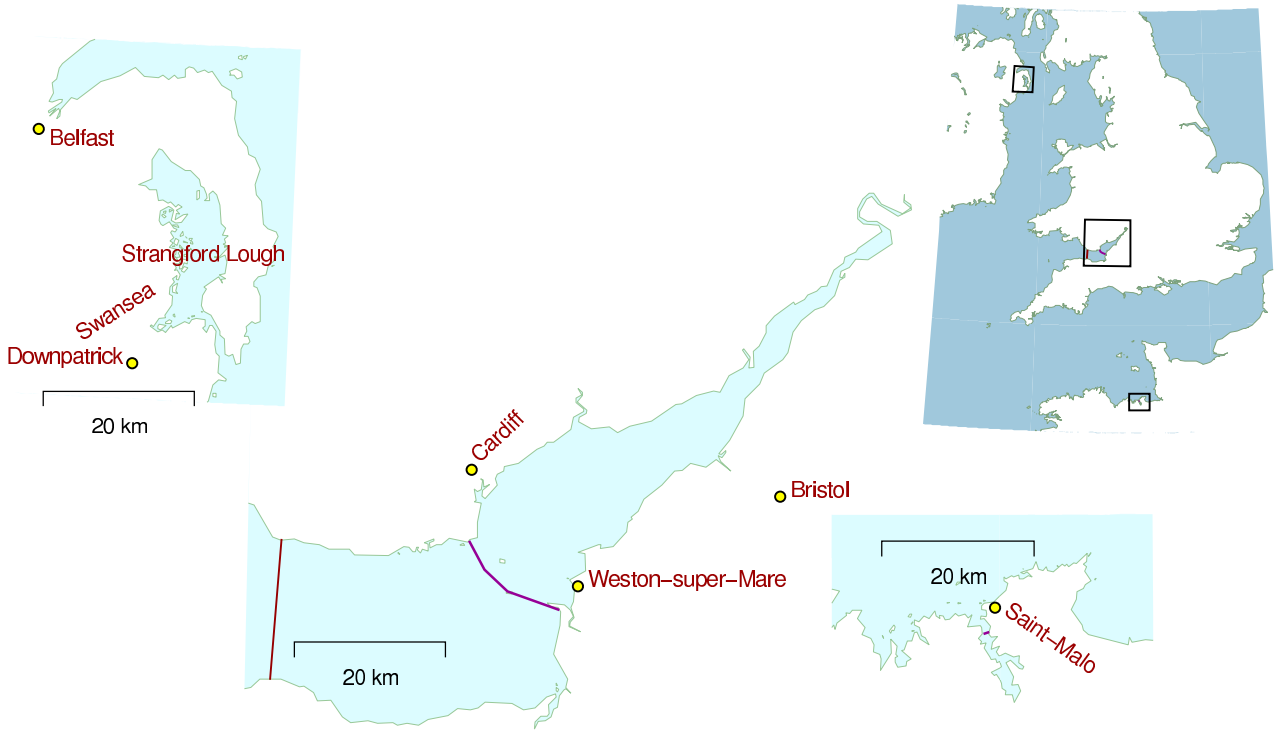


Figura 14.8. Proposte inerenti lo sbarramento del Severn (in basso a sinistra), e Strangford Lough, Irlanda del Nord (in alto a sinistra), mostrate alla stessa scala dello sbarramento di La Rance (in basso a destra).
La mappa mostra due località proposte per uno sbarramento del Severn. Uno sbarramento a Weston-super-Mare consegnerebbe una potenza media di 2 GW (0.8 kWh/gg a persona). L'alternativa, posta più all'esterno, erogherebbe il doppio.
Le maree sono una grande risorsa in Irlanda del Nord a Strangford Lough. L'area di Strangford Lough è di 150 km^2; l'escursione di marea nel Mare d'Irlanda è oltre i 4.5 m per quelle sigiziali e 1.5 m per quelle di quadratura – purtroppo non è così grande come l'escursione di La Rance o del Severn. La potenza grezza del bacino naturale a Strangford Lough è di circa 150 MW, che, suddivisa tra gli 1.7 milioni di abitanti dell'Irlanda del Nord, arriva a 2 kWh/gg a persona. Strangford Lough è il sito del primo generatore a flusso di marea allacciato alla rete elettrica nel Regno Unito.

Il Capitolo G elenca le velocità di flusso nelle migliori zone di tutto il Regno Unito, valutando che ne potrebbero venire estratti 9 kWh/gg a persona.

Sbarramenti

Gli sbarramenti delle maree sono una tecnologia collaudata. Il famoso sbarramento di La Rance in Francia, dove l'escursione di marea ammonta ad un esorbitante 8 metri di media, ha prodotto una potenza media di 60 MW dal 1966. L'escursione delle maree nell'estuario del Severn è altresì insolitamente grande. A Cardiff è di 11.3 m, per le maree sigiziali, e 5.8 m per quelle di quadratura. Se uno sbarramento fosse posto di fronte alla foce del Severn (da Weston-super-Mare a Cardiff), si avrebbe un bacino per le maree di 500 km^2 (figura 14.8). Notate come questo bacino sia molto più grande dell'estuario a La Rance. Quale potenza sarebbe in grado di fornire un tale bacino per le maree, se lasciassimo fluire l'acqua dentro e fuori nei momenti ideali, di modo che generi sia la marea crescente che il riflusso? Secondo i numeri teorici in tabella 14.4, quando l'escursione è di 11.3 m, la potenza media quale contribuito dello sbarramento (a 30 W/m^2) sarebbe al massimo di 14.5 GW, ossia **5.8 kWh/gg a persona**. Laddove l'escursione è di 5.8 m, il contributo dello sbarramento in termini di potenza media (a 8 W/m^2) sarebbe al massimo di 3.9 GW, ossia **1.6 kWh/gg a persona**. Questi numeri presuppongono che l'acqua entri con un singolo

impulso al picco di alta marea, e fuoriesca in un unico impulso di bassa marea. Nella pratica, afflusso ed efflusso si svilupperebbero in un paio d'ore, il che ridurrebbe di un po' la potenza erogata. Le attuali proposte di sbarramento genereranno potenza in una sola direzione. Questo riduce la potenza erogata di un altro 50%. Le relazioni degli ingegneri sulla proposta per lo sbarramento del Severn dicono che, generando sul solo riflusso, il contributo sarebbe in media di 0.8 kWh/gg a persona. Lo sbarramento offrirebbe inoltre una protezione dalle inondazioni per un valore di circa £120M all'anno.

Lagune per le maree

Le lagune per le maree vengono create con la costruzione di muri nel mare e possono quindi essere utilizzate come estuari artificiali. Le condizioni richieste per la costruzione di lagune sono che l'acqua sia bassa e l'escursione di marea grande. Qui si applica l'economia di scala: grandi lagune per le maree rendono l'elettricità più conveniente di quelle piccole. Le due sedi principali per grandi lagune per le maree in Gran Bretagna sono il Wash sulla costa orientale, e le acque al largo di Blackpool, sulla costa occidentale (figura 14.9). Strutture più piccole potrebbero essere costruite nel nord del Galles, Lincolnshire, nel sud-ovest del Galles e nell'East Sussex.

Figura 14.9. Due lagune per le maree, ciascuna con una superficie di 400 km^2, una al largo di Blackpool, ed una presso il Wash. È stato evidenziato anche l'estuario del Severn per un confronto.

Se due lagune vengono costruite in un unico luogo, si può utilizzare un trucco per aumentare la potenza erogata e per consentire alle lagune di erogare potenza su richiesta, in qualsiasi momento, indipendentemente dallo stato della marea. Una laguna può essere designata quale laguna "alta", e l'altra quale laguna "bassa". Con la bassa marea, un po' della potenza generata dallo svuotamento della laguna alta può essere usata per pompare l'acqua *fuori* da quella bassa, rendendo il suo livello inferiore a quello dell'acqua bassa. L'energia necessaria per pompare giù il livello della laguna bassa viene poi ripagata con gli interessi durante l'alta marea, allorché viene generata potenza lasciando che l'acqua si riversi nella laguna bassa. Allo stesso modo, una maggiore quantità d'acqua può essere pompata nella laguna alta durante l'alta marea, impiegando l'energia generata dalla laguna bassa. Qualunque sia lo stato in cui si trovi la marea, una laguna o l'altra sarebbe in grado di generare energia. Tale coppia di lagune per le maree potrebbe anche funzionare come un impianto di stoccaggio mediante pompaggio, immagazzinando l'energia in eccesso dalla rete elettrica.

La potenza media per unità di superficie delle lagune per le maree nelle acque britanniche potrebbe essere 4.5 W/m^2; per cui, se fossero realizzate lagune per maree per una superficie totale di 800 km^2 (come indicato in figura 14.9), la potenza generata sarebbe 1.5 kWh/gg a persona.

Bellezza delle maree

Conteggiato tutto, sbarramenti, lagune e parchi marini con centrali mareomotrici potrebbero offrire qualcosa come 11 kWh/gg a persona (figura 14.10).

La potenza delle maree non è mai stata utilizzata su scala industriale in Gran Bretagna, è difficile, quindi, sapere quali sfide economiche e tecniche saranno sollevate in merito, qualora si costruissero e si dovessero mantenere turbine messe in funzione dalle maree – corrosione, accumulo di limo, relitti che vi si impigliano? Ma ecco qui sette ragioni per essere entusiasti delle maree nelle Isole Britanniche. 1. L'energia delle maree è del tutto prevedibile; a differenza di quella del vento e del sole, la potenza mareomotrice è una fonte rinnovabile su cui si potrebbe dipendere e che lavora giorno e notte per tutto l'anno; tramite le lagune per le maree, l'energia può essere immagazzinata, di modo che la potenza può essere fornita su richiesta. 2. Il succedersi di alte e basse maree impiega circa 12 ore a progredire intorno alle Isole Britanniche, per cui le correnti più forti al largo di Anglesey, Islay, Orcadi e Dover si verificano in momenti diversi le une dalle altre; in questo modo una serie di parchi mareomotori potrebbe produrre nel suo insieme un contributo alla rete elettrica più costante di quello di un singolo parco, pur essendo che tale contributo si sposterebbe in su e in giù, variando con le fasi lunari. 3. La potenza mareomotrice durerà milioni di anni. 4. Non richiede apparecchi e strutture ad alto costo, in contrasto con il solare fotovoltaico. 5. Inoltre, poiché la densità di potenza di un tipico flusso di marea è maggiore della densità di potenza di un vento tipico, una turbina da 1 MW azionata dalla marea ha dimensioni inferiori rispetto ad una turbina eolica da 1 MW; probabilmente le turbine mareomotrici potrebbero per questo essere più economiche di quelle eoliche. 6. La vita sotto le onde è tranquilla; non esiste nulla di assimilabile ad una mostruosa "tempesta di marea"; pertanto, a differenza delle turbine eoliche, che richiedono costose attività di ingegneria per resistere alle rare tempeste di vento, le turbine azionate dalle maree, essendo sommerse nell'acqua, non richiederanno grandi fattori di sicurezza nella loro progettazione. 7. Gli esseri umani per lo più vivono sulla terraferma, e non possono vedere sotto il mare; pertanto, le obiezioni concernenti l'impatto visivo delle turbine azionate dalle maree dovrebbero essere meno forti delle obiezioni alle turbine eoliche.

False credenze

L'energia delle maree, per quanto pulita e verde, non dovrebbe essere chiamata rinnovabile. Estrarre potenza dalle maree rallenta la rotazione della Terra. Decisamente non possiamo utilizzare l'energia delle maree nel lungo termine.

Falso. Le maree naturali già rallentano la rotazione della Terra. La perdita naturale di energia di rotazione è pari a circa 3 TW (Shepherd, 2003).

Grazie all'attrito naturale delle maree, ogni secolo, la giornata si allunga di 2.3 millisecondi. Tanti sistemi di estrazione dell'energia dalle maree, per quanto numerosi, estrarrebbero un'energia che sarebbe comunque andata persa in attrito. Ma anche se *raddoppiassimo* la potenza estratta dal sistema Terra-Luna, l'energia delle maree durerebbe ancora più di un miliardo di anni.

Note ed approfondimenti

p.

90 *La potenza di un bacino artificiale.* La potenza per unità di superficie di un bacino per le maree è un "derivato" del Capitolo G, p. 347.

91 *La Gran Bretagna è già dotata di un bacino per le maree naturale … conosciuto come Mare del Nord.* Non vorrei aver dato l'impressione che il Mare del Nord si riempia e si svuoti con la marea come una sorta di piscina sulla costa inglese. I flussi nel Mare del Nord sono più complessi, dato che il tempo impiegato da un urto a livello dell'acqua a propagarsi attraverso il mare è simile all'intervallo temporale tra le maree. Esistono tuttavia correnti di marea enormi in entrata ed in uscita dal Mare del Nord, nonché al suo stesso interno.

92 *La potenza in ingresso totale delle onde di marea lunare che attraversa queste linee è stata misurata essere 100 kWh al giorno per persona.* Fonte: Cartwright et al. (1980). Per i lettori che gradiscono i modelli stile conti-della-serva, il Capitolo Tecnico G mostra come stimare tale potenza a partire dalle basi.

93 *La Rance* ha generato 16 TWh in 30 anni. Il che significa una potenza media di 60 MW. (La sua potenza di picco è 240 MW). L'escursione della marea raggiunge i 13.5 m; l'area imprigionata è di 22 km^2; lo sbarramento è lungo 750 m. Densità di potenza media: 2.7 W/m^2. Fonte: [6xrm5q].

94 *Le relazioni degli ingegneri sullo sbarramento del Severn… dicono 17 TWh/anno.* (Taylor, 2002b). Questo (2 GW) corrisponde al 5% dell'attuale consumo totale di elettricità del Regno Unito, come valore medio.

– *La potenza per unità di superficie delle lagune per maree potrebbe essere pari a 4.5 W/m^2.* MacKay (2007a).

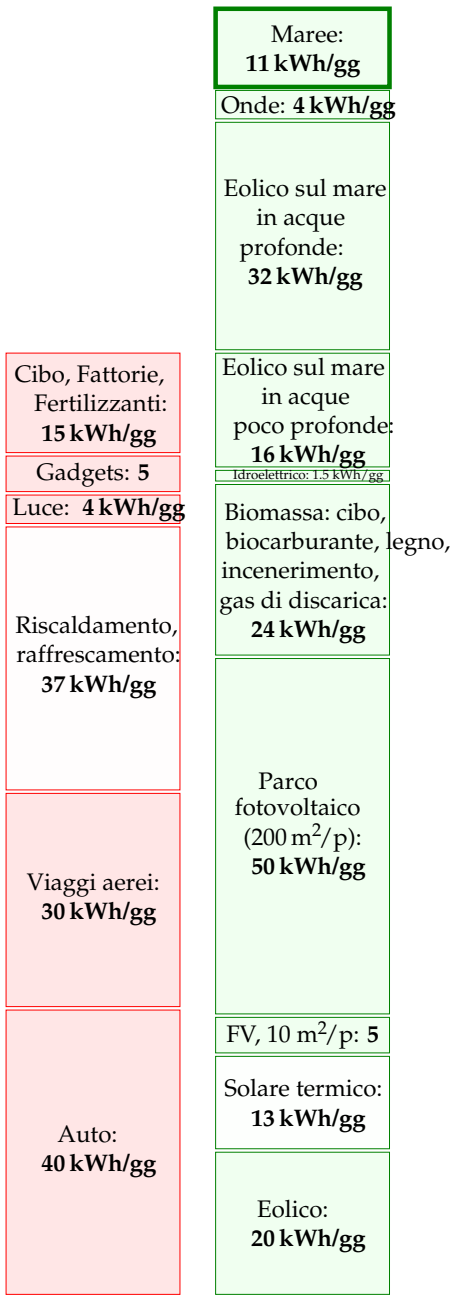


Figura 14.10. Maree.

15 Roba varia

Figura 15.1. Réclame spazzatura dei magazzini Selfridges ["Lo vuoi. Lo compri. Te ne dimentichi." (N.d.T.)].

Una delle principali ragioni di consumo di energia nel mondo "sviluppato" è la produzione di roba varia. Questa, lungo il suo naturale ciclo di vita, attraversa tre fasi. La prima fase prevede che un manufatto appena fabbricato venga posto sullo scaffale di un negozio e presentato avvolto in uno scintillante imballaggio. A questo stadio, la roba è chiamata "bene di consumo". Appena la si porta a casa e la si libera dalla scatola che la contiene, si trasforma da "bene" ad "oggetto". Sotto questa forma rimane in uso al suo acquirente per un tempo che varia da alcuni mesi ad alcuni anni. Durante questo periodo rimane lungamente ignorata dal suo proprietario che continua ad uscire di casa per andare a comprare altri beni. Alla fine, attraverso il miracolo dell'alchimia moderna, è trasformata nella sua forma finale, ovvero, quella di rifiuto. Ad un occhio inesperto può essere difficile distinguere questo stato da quello di "bene" che già fu. In ogni caso, a questo punto, l'attento possessore paga i netturbini perchè gliela portino via.

Supponiamo di voler capire meglio il costo energetico totale di un manufatto, magari con l'intento di riprogettarlo meglio. Questo processo è chiamato analisi del ciclo di vita. Per convenzione si suddivide il costo energetico di ogni manufatto, che sia un asciugacapelli o una nave da crociera, in quattro fasi:

Fase B: preparazione dei **prodotti di Base**. Questa fase comprende l'estrazione dei minerali dal sottosuolo, la loro fusione, purificazione e trattamento finale in maniera da diventare come dei mattoncini del Lego alla base di tutto: esempi di questi sono la plastica, il vetro, i metalli, e le ceramiche. I costi dell'energia consumata includono anche quelli del trasporto verso la prossima destinazione.

Fase P: Produzione. In questa fase i prodotti di base sono trasformati in artefatti. La fabbrica di un asciugacapelli consuma calore e luce per saldare le resistenze, per forgiare le linee graziose della forma esterna e per assemblare tutti i componenti. I costi energetici di questa fase includono l'imballaggio e il trasporto necessario.

Fase U: Uso. Gli asciugacapelli e le navi da crociera ciucciano energia quando sono usati per lo scopo per cui sono stati fabbricati.

Fase D: Discarica. Questa fase comprende il costo energetico del restituire il manufatto perché venga messo in un buco nel terreno (discarica) o perché divenga nuovamente un prodotto di base (riciclo) nonché quello di ripulire tutto l'inquinamento associato.

	energia contenuta (kWh per kg)
carburante fossile	10
legno	5
carta	10
vetro	7
plastica PET	30
alluminio	40
acciaio	6

Tabella 15.2. Energia contenuta nei materiali

Al fine di comprendere quanta energia consuma la roba nel corso della sua vita, dobbiamo stimare i costi energetici per ognuna delle quattro fasi

e sommarle. In genere una delle quattro ha un peso preponderante, quindi abbiamo bisogno di una stima accurata solo del costo di quella per arrivare a determinare una stima ragionevole del totale. Se vogliamo riprogettare la roba perchè si riducano i costi energetici, dobbiamo, in linea con quanto si fa abitualmente, focalizzarci sulla riduzione del costo della fase dominante, assicurandoci, allo stesso tempo, che le riduzioni di energia in questa non si accompagnino ad un aumento dei costi energetici delle altre tre.

Piuttosto che stimare in dettaglio quanta potenza richiede la produzione continua e il trasporto di tutte le cose, cerchiamo di affrontare l'argomento facendo riferimento prima ad alcuni esempi comuni: i contenitori delle bevande, i computer, le pile, la posta indesiderata, le automobili e le case. In questo capitolo ci focalizzeremo sui costi energetici delle fasi B e P. Questi costi energetici sono chiamati a volte anche energia "incorporata" o "congelata" [*embodied* ed *embedded*, nel testo originale – in italiano, per aumentare la confusione si usano anche gli aggettivi "virtuale", "grigia" o "nascosta". (N.d.T)] – questi aggettivi sono un pò imprecisi, dal momento che quell'energia non è, letteralmente parlando, nè incorporata nè congelata dentro al manufatto.

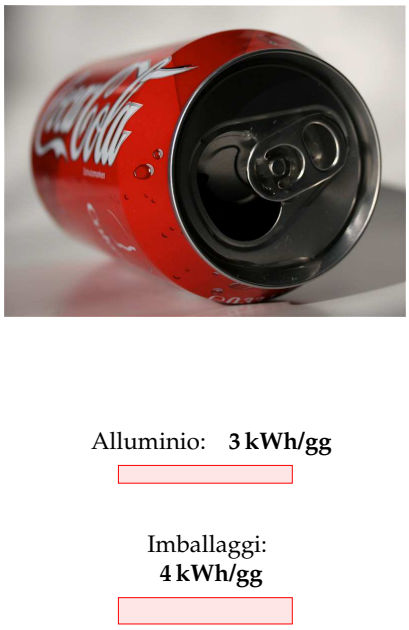


Figura 15.3. Cinque lattine di alluminio al giorno equivalgono a 3 kWh/gg. L'energia incorporata in altri imballaggi buttati via da un cittadino medio inglese equivale a 4 kWh/gg.

Contenitori di bevande

Ipotizziamo di avere l'abitudine di bere Coca Cola e che, dopo avere bevuto cinque lattine al giorno di questo prodotto chimico multinazionale si getti via il vuoto di alluminio. In questo caso è la fase B che predomina. La produzione di metalli è un'attività altamente energivora, in particolare quando si considera l'alluminio. La produzione di una sola lattina di alluminio richiede 0.6 kWh. In questo modo, consumandone cinque al giorno, si butta via energia al ritmo di 3 kWh/gg.

Se prendiamo in esame una bottiglietta di acqua minerale da 500 ml fatta con la plastica PET (che pesa 25 g), l'energia incorporata è 0.7 kWh – giusto tanto cattiva quanto una lattina di alluminio!

Altri imballaggi

Un cittadino medio inglese getta via 400 g di imballaggi al giorno – principalmente quelli che contengono cibo. L'energia incorporata dai contenitori varia da 7 a 20 kWh per kg se si considera l'intero campionario di contenitori di vetro, carta, plastica o acciaio. Ipotizzando che l'energia media incorporata sia tipicamente pari a 10 kWh/kg, possiamo stimare che l'energia legata agli imballaggi sia di 4 kWh/gg. Una parte di questa energia incorporata è recuperabile attraverso l'incenerimento dei rifiuti, come sarà discusso nel Capitolo 27.

Computer

Microchip: **2.5 kWh/gg**

Produrre un personal computer costa 1800 kWh di energia. In questo modo, acquistare un nuovo computer ogni due anni, corrisponde ad un consumo di 2.5 kWh al giorno.

Figura 15.4. Fabbricazione di microchip. Foto ABB.
Produrre un personal computer ogni due anni costa 2.5 kWh/gg.

Batterie a pila

Il costo energetico per fabbricare una pila ricaricabile di tipo AA al nichel-cadmio, che immagazzina 0.001 kWh di energia elettrica ed ha una massa di 25 g, è di 1.4 kWh (fasi B e P). Se il costo di una pila usa e getta è simile, buttando via due batterie di tipo AA al mese si consuma circa 0.1 kWh/giorno. Il costo energetico delle batterie a pila occupa quindi con ogni probabilità assai poco spazio nella vostra colonna dei consumi.

Giornali, riviste e materiale pubblicitario nella buca delle lettere

Giornali,
posta indesiderata,
riviste:
2 kWh/gg

Un giornale di 36 pagine, distribuito gratuitamente nelle stazioni ferroviarie, pesa 90 g. Il Cambridge Weekly News (56 pagine) [è il settimanale locale di Cambridge. (N.d.T)] pesa 150 g. Il quotidiano *The Independent* (56 pagine) pesa 200 g. Una rivista patinata che pubblicizza le case in vendita composta da 56 pagine, e il Cambridgeshire Pride Magazine (32 pagine), entrambe gratuite e inviate a casa, pesano rispettivamente 100 g e 125 g.

La massa di pubblicazioni e di posta indesiderata infilata nella nostra buca delle lettere contiene energia. Altra ne costa il produrla e consegnarla. La carta ha un'energia incorporata di 10 kWh/kg. In questa maniera l'energia incorporata in un flusso medio che comprenda materiale pubblicitario, riviste e giornali per un totale di 200 g di carta al giorno per persona (che equivale ad una copia del quotidiano *The Independent* al giorno per persona, per esempio) è di circa 2 kWh/gg.

L'eventuale riciclo della carta può far risparmiare metà dell'energia impiegata nella sua fabbricazione; la sua combustione in un inceneritore o nel caminetto di casa può permettere l'uso di parte dell'energia in essa contenuta.

Roba varia più voluminosa

Costruzione casa: **1kWh/gg**

La casa è il più grande manufatto che la maggior parte delle persone compra.

Nel Capitolo H si stima il costo energetico per costruire una nuova casa. Ipotizzando di ricostruire ogni casa ogni 100 anni, la stima del costo energetico è di 2.3 kWh/gg. Questa è l'energia per costruire solo lo *scheletro* della casa – le fondamenta, i mattoni, le piastrelle e gli architravi del tetto. Se l'indice di occupazione medio della casa è di 2.3, la stima della spesa energetica media per costruire una casa è di 1 kWh al giorno per persona. E per quanto riguarda un'automobile, o una strada? Alcuni di noi

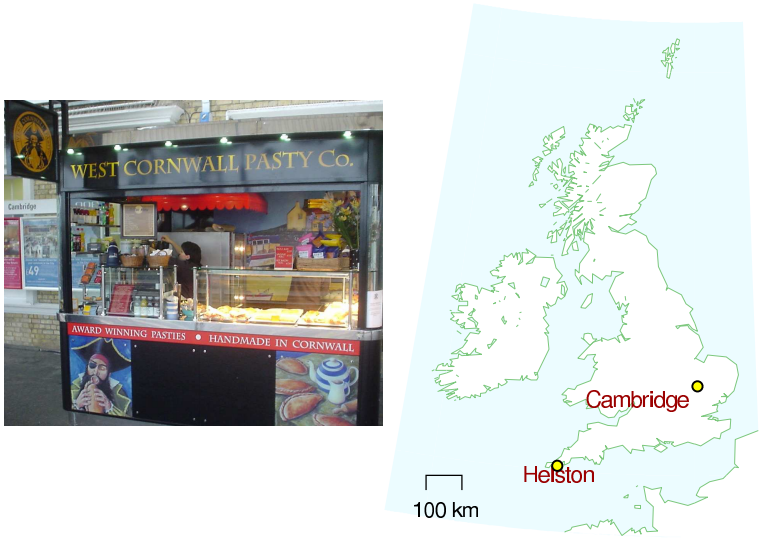


Figura 15.5. I chilometri del cibo – I panzerotti ripieni [chiamati in inglese *pasty* e tipici della regione della Cornovaglia. (N.d.T.)], fatti a mano nella cittadina di Helston in Cornovaglia, vengono trasportati per 580 km fino a Cambridge, dove sono consumati [la foto di riferisce al baracchino presente all'interno della stazione ferroviaria di Cambridge. (N.d.T)].

possiedono la prima, ma generalmente condividono la seconda. L'energia incorporata da un'automobile nuova è di 76 000 kWh – L'analisi del ciclo di vita sviluppata da Treloar, Love e Crawford stima che il costo per costruire una strada in Australia sia di 7600 kWh al metro (nel caso di manto stradale in cemento rinforzato), e che aggiungendo i costi di manutenzione il costo energetico totale su un periodo di 40 anni sia di 35 000 kWh al metro. Traduciamo, allora, questi numeri in una stima grossolana del costo energetico di una strada in Gran Bretagna dove ci sono 45 000 chilometri di strade nazionali (escludendo le autostrade). Ipotizzando 35 000 kWh al metro per 40 anni, queste strade ci costano 2 kWh/gg per persona.

Fabbricazione auto:
14 kWh/gg

Costruzione strade: **2 kWh/gg**

Il trasporto della roba

Fino ad ora si è cercato di fornire una stima del consumo *personale*. "Se si tracannano cinque lattine di Coca-Cola, fa 3 kWh; se si compra il quotidiano *The Independent*, fa 2 kWh." Da adesso in poi le cose cominceranno ad essere leggermente meno personali. Dal momento che si stimerà l'energia richiesta per il trasporto della roba varia all'interno della Gran Bretagna ed in giro per il Pianeta, si guarderà alla somma totale a livello nazionale e la si dividerà per la popolazione.

Il trasporto delle merci è misurato in tonnellate al chilometro (t-km). Se una tonnellata di panzerotti ripieni della Cornovaglia viene trasportata per 580 km (figura 15.5), allora si dice che il trasporto merci ammonta a 580 t-km. L'intensità energetica del trasporto su strada nel Regno Unito è di circa 1 kWh per t-km.

Quando la nave portacontainer di figura 15.6 trasporta 50 000 tonnellate di carico per una distanza di 10 000 km, si dice che raggiunge 500 mln t-km

Figura 15.6. La nave portacontainer *Ever Uberty* attraccata al Terminal Container del porto di Londra-Tamigi sul fiume Medway. Foto di Ian Boyle `www.simplonpc.co.uk`.

di trasporto merci. L'intensità energetica del trasporto merci di questa portacontainer è di 0.015 kWh per t-km. Si noti quanto sia molto più efficiente il trasporto su portacontainer di quello su strada. Queste intensità energetiche sono riportate in figura 15.8.

Trasporto di roba su gomma

Nel 2006 in Gran Bretagna, la somma totale dei trasporti su gomma con l'uso di autocarri è stata di 156 miliardi di t-km. Diviso tra i 60 milioni di abitanti, questo significa 7 t-km al giorno per persona, che equivale energeticamente a 7 kWh al giorno per persona (ipotizzando un'intensità energetica di 1 kWh per t-km). Un quarto di questo trasporto, tra l'altro, è stato per il cibo, le bevande e il tabacco.

Roba via gomma: **7 kWh/gg**

Figura 15.7. Carico e scarico degli autocarri. Costo energetico delle merci su gomma nel Regno Unito: 7 kWh/d per persona.

Trasporto via acqua

Nel 2002, 560 milioni di tonnellate di merci sono transitate dai porti inglesi. Il Tyndall Centre ha calcolato che la quota parte della Gran Bretagna del costo energetico del trasporto marittimo internazionale è di 4 kWh/giorno per persona.

Roba via mare: **4 kWh/gg**

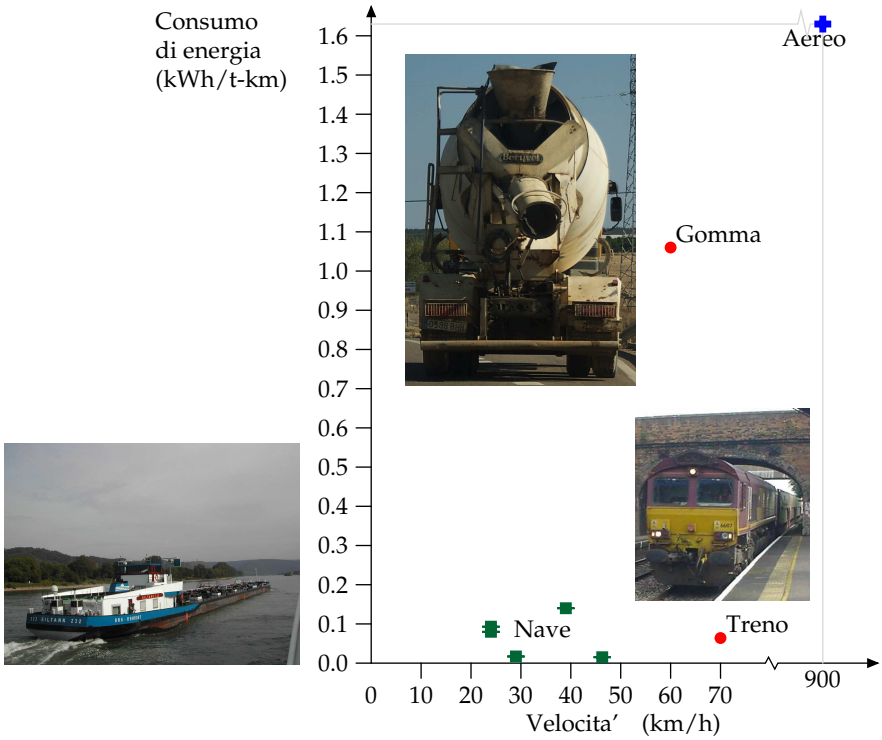


Figura 15.8. Fabbisogni energetici per differenti modi di trasporto della roba. L'asse verticale del grafico mostra l'energia consumata in kWh per per ogni t-km netta (cioè, l'energia per spostare le merci per t-km non comprendendo il peso del veicolo).
Si veda anche figura 20.23 (fabbisogni energetici per il trasporto passeggeri).

Il trasporto via acqua richiede dell'energia perchè le barche producono onde. In ogni caso, il trasporto della roba su nave è sorprendentemente efficiente dal punto di vista energetico.

Trasporto dell'acqua; trattamento delle acque reflue

Anche se l'acqua non è qualche cosa di molto attraente, ne facciamo un grande uso – circa 160 litri al giorno per persona. Dopo averla usata la restituiamo sotto forma di acque reflue per circa 160 litri al giorno, alle società che gestiscono gli impianti fognari. Nel Regno Unito il costo per pompare l'acqua e per trattare le acque reflue è di circa 0.4 kWh al giorno per persona.

Desalinizzazione

Al momento il Regno Unito non spende energia per desalinizzare l'acqua. Ma sono in corso degli studi per costruire degli impianti di desalinizzazione a Londra. Qual è il costo energetico per trasformare l'acqua salata in quella dolce? Il metodo meno energivoro è quello dell'osmosi inversa. Questo consiste nel prendere una membrana che permette di far passare solo l'acqua, e ponendo l'acqua salata da un lato della stessa, si pompa questa attraverso la membrana stessa. L'acqua oppone una certa resistenza quando viene filtrata dalla membrana: la produzione di acqua più pura è un processo che non avviene spontaneamente, perchè l'acqua da sola separata dal sale presenta una bassa entropia e la natura preferisce stati ad alta entropia dove ogni elemento o composto è mischiato con gli altri. Si deve pagare molto in termini energetici per ottenere la separazione di elementi o composti che sono mescolati tra loro.

L'isola di Jersey ha un impianto di desalinizzazione che può produrre 6000 m^3 di acqua dolce al giorno (figura 15.10). Se si considerano anche i sistemi di pompaggio che estraggono l'acqua dal mare e la fanno passare attraverso una serie di filtri, l'intero impianto utilizza una potenza di 2 MW. Questo dato significa un costo energetico di 8 kWh per m^3 di acqua dolce prodotta. A questo costo, un consumo quotidiano di acqua di 160 litri richiederebbe 1.3 kWh al giorno.

Fornitura
e trattamento acqua:
0.4 kWh/gg

Figura 15.9. Fornitura acqua potabile: 0.3 kWh/gg; trattamento acque reflue: 0.1 kWh/gg.

Roba in vendita

Supermercati:
0.5 kWh/gg

I supermercati nel Regno Unito consumano circa 11 TWh di energia all'anno. Divisi equamente tra 60 milioni di clienti felici, questo significa una potenza di 0.5 kWh al giorno per persona.

L'importanza della roba importata

Nei calcoli standard del "consumo energetico" o "dell'impronta di carbonio" della Gran Bretagna la roba importata *non* viene conteggiata. Quando si produceva in loco, come nel 1910, l'impronta di carbonio per persona era tanto grande quanto quella oggi in America. Oggigiorno la Gran Bretagna non fabbrica più molto (in questo modo il consumo energetico

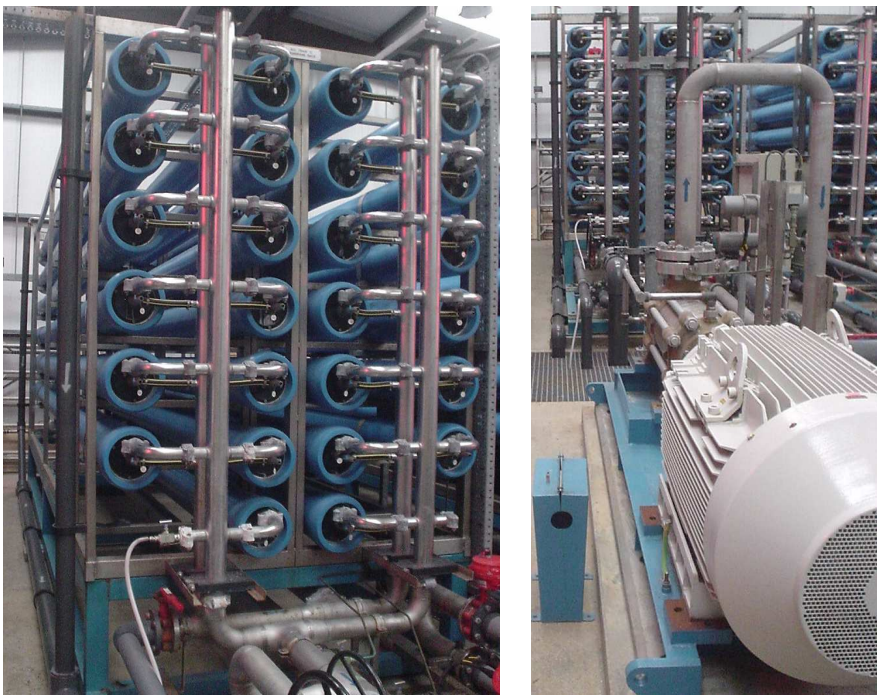


Figura 15.10. Particolare dell'impianto di desalinizzazione della società Jersey Water ad osmosi inversa. La pompa, in primo piano sulla destra, ha una potenza di 355 kW e spinge l'acqua marina alla pressione di 65 bar attraverso 39 membrane a spirale nei banchi orizzontali di tubi blu ,sulla sinistra, producendo 1500 m^3 al giorno di acqua dolce. Il costo totale dell'acqua dolce prodotta da questo impianto è di 8 kWh per m^3.

e le emissioni di anidride carbonica sono calate un pò), ma continuiamo ad amare aggeggi e roba varia e lasciamo che siano fatti per noi da altri Paesi. Dovremmo per questo ignorare il costo energetico di fabbricazione, solo perchè è roba d'importazione? Penso proprio di no. Dieter Helm e i suoi colleghi di Oxford, stimano che l'impatto della Gran Bretagna sulle emissioni risulta quasi *raddoppiato*, dalle ufficiali "11 tonnellate di CO_2e per persona" a circa 21 tonnellate, considerando le cose importate ed esportate. Questo significa che il più grosso contributo alle emissioni di un cittadino britannico medio è il costo energetico per produrre la roba varia importata.

Nel Capitolo H, si investigherà meglio questa idea, guardando al peso che hanno le importazioni per il Regno Unito. Non considerando, al momento, le importazioni di carburante, gli inglesi importano un pò più di 2 tonnellate a persona di roba ogni anno, di cui circa 1.3 tonnellate per persona è roba fabbricata ed assemblata, come veicoli, macchinari, elettrodomestici e apparecchi elettrici ed elettronici. Questo dato significa 4 kg al giorno per persona di roba. Tali beni sono principalmente costituiti da materiali la cui produzione ha richiesto almeno 10 kWh di energia per kg di roba. Si arriva così a stimare che questa massa di auto, frigoriferi, forni a microonde, computer, fotocopiatrici e televisori ha un'energia incorporata di circa 40 kWh al giorno per persona.

Al fine di sintetizzare i ragionamenti sulla roba varia e il suo trasporto, si riporta nella colonna del consumo il valore di 48 kWh al giorno per per-

sona concernente la fabbricazione (come risultato della somma di almeno 40 per la parte legata all'importazione, 2 al giornale quotidiano, 2 alla costruzione delle strade, 1 alla costruzione delle case e 3 agli imballaggi) e di 12 kWh al giorno per persona, da una parte, per il trasporto della roba via acqua, su gomma, e via condutture e, dall'altra, per la conservazione del cibo nei supermercati.

Lavora fino a quando potrai acquistare.

Detto popolare

Note ed approfondimenti

p.

98 *La produzione di una sola lattina di alluminio richiede 0.6 kWh.* La massa di una lattina è 15 g. l'energia totale per produrre l'alluminio è stimata essere compresa tra 60 MJ/kg e 300 MJ/kg. [yx7zm4], [r22oz], [yhrest]. I numeri utilizzati provengono dall' Aluminum Association [Associazione Produttori Alluminio]. [y5as53]: 150 MJ per kg di alluminio (40 kWh/kg).

– *L'energia incorporata in una bottiglietta di acqua minerale fatta con la plastica PET.* Fonte: Hammond and Jones (2006) – L'energia incorporata nella plastica PET è 30 kWh per kg.

– *Un cittadino medio inglese getta via 400 g di imballaggi al giorno.* Nel 1995 in Gran Bretagna se ne consumavano 137 kg per persona (Hird et al., 1999).

99 *Produrre un personal computer costa 1800 kWh di energia.* La fabbricazione di un PC richiede (in energia e materie prime) l'equivalente in combustibili fossili pari a circa 11 volte il suo peso. I frigoriferi 1–2 volte il loro peso. Le automobili 1–2 volte il loro peso. Williams (2004); Kuehr (2003).

– *...una batteria a pila ricaricabile al nichel-cadmio di tipo AA.* Fonte: Rydh and Karlström (2002).

98 *...acciaio...* Tratto da Swedish Steel: "Il consumo di carbone e coke per tonnellata di acciaio finito è di 700 kg, che equivale a circa 5320 kWh. Il consumo di petrolio, di gas GPL ed elettricità è di 710 kWh per tonnellata di prodotto finito. Il consumo totale di energia [primaria] risulta essere in questo modo di circa 6000 kWh per tonnellata di acciaio finito". (6 kWh al kg.) [y2ktgg]

100 *L'energia incorporata da un'automobile nuova è di 76 000 kWh.* Fonte: Treloar et al. (2004). Burnham et al. (2007) fornisce una stima inferiore: 30 500 kWh come costo energetico netto del ciclo di vita di un'automobile. Uno dei motivi della differenza può essere che quest'ultimo studio ipotizza che il veicolo sia riciclato, riducendo così il costo netto dei materiali.

99 *La carta ha un'energia incorporata di 10 kWh al kg.* Stampare un giornale su carta ottenuta dalla cellulosa vergine richiede un'energia di circa 5 kWh/kg; infatti la carta ha un contenuto energetico simile a quello del legno [da cui è ottenuta la cellulosa. (N.d.T.)]. (Fonte: Ucuncu (1993); Erdincler and Vesilind (1993); si veda p. 317).

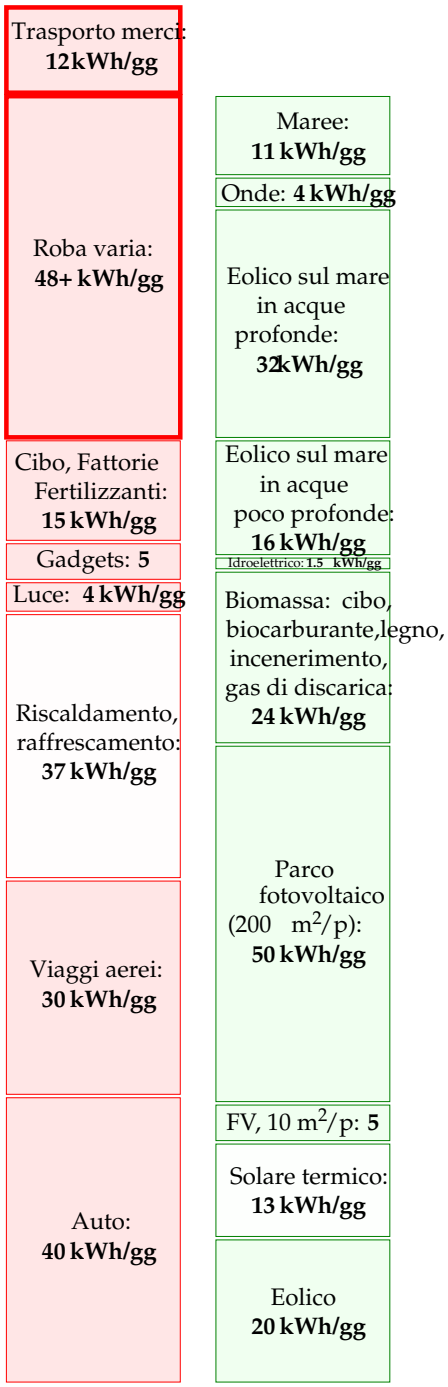


Figura 15.11. Produrre roba varia per noi costa per lo meno 48 kWh/giorno. Trasportarla 12 kWh/giorno.

I costi energetici variano a seconda delle cartiere e dei Paesi. 5 kWh/kg è la stima per una cartiera svedese che produce carta da giornale nel 1973, così come riportato da Norrström (1980), il quale ha stimato che misure di efficientamento potrebbero ridurre il costo a circa 3.2 kWh/kg. Un'analisi più recente dell'intero ciclo di vita (Denison, 1997) stima come pari a 12 kWh/kg il costo energetico netto negli USA della stampa su carta prodotta da cellulosa vergine a cui segue il conferimento alla discarica o all'inceneritore. Il costo energetico per la carta da stampa prodotta a partire da materiale riciclato e in seguito riciclata a sua volta è di 6 kWh/kg.

100 *L'intensità energetica del trasporto su strada nel Regno Unito è circa 1 kWh per t-km.* Fonte: `www.dft.gov.uk/pgr/statistics/datatablespublications/energyenvironment`.

101 *L'intensità energetica del trasporto merci di questa nave portacontainer è di 0.015 kWh per t-km.* La nave *Ever Uberty* – lunghezza 285 m, larghezza 40 m – ha una capacità di 4948 TEU, una capacità di carico di 63 000 t, e una velocità di crociera di 25 nodi; la potenza media fornita dal suo motore è di 44 MW. Un TEU è la taglia di un piccolo container da 20 piedi – circa 40 m^3. La maggior parte dei container che si vedono oggigiorno misurano 40 piedi con una taglia di 2 TEU. Questi pesano 4 tonnellate e possono trasportare 26 tonnellate di roba varia. Ipotizzando che il motore sia efficiente al 50%, il consumo energetico di questa nave risulta essere di 0.015 kWh di energia chimica per t-km. `www.mhi.co.jp/en/products/detail/container_ship_ever_uberty.html`

– *quota parte della Gran Bretagna del costo energetico del trasporto via mare internazionale...* Fonte: Anderson et al. (2006).

101 *Figura 15.8.* **Consumo energetico delle navi.** I cinque punti riportati nella figura sono riferiti ad una portacontainer (46 km/h), una nave portarinfuse (24 km/h), una petroliera (29 km/h), una chiatta (24 km/h), e la nave a propulsione nucleare NS Savannah (39 km/h).

Nave portarinfuse 0.08 kWh/t-km. Una nave con un volume di carico di granaglie pari a 5200 m^3 presenta una portata lorda di 3360 tonnellate. (Il Tonnellaggio di Portata Lorda, TPL, è riferito alla massa di carico che una nave può trasportare.) Viaggia ad una velocità di 13 nodi (24 km/h); l'unico motore con una potenza di 2 MW consuma 186 g di carburante per kWh di energia fornita (42% di efficienza). `conoship.com/uk/vessels/detailed/page7.htm`

Petroliera Una petroliera moderna utilizza 0.017 kWh/t-km [`6lbrab`]. Peso di carico 40 000 t. Capacità: 47 000 m^3. Motore principale: 11.2 MW di potenza massima erogata. Velocità a 8.2 MW: 15.5 nodi (29 km/h). L'energia contenuta nel petrolio trasportato è di 520 milioni di kWh. In questo modo l'1% dell'energia del petrolio è utilizzata per trasportare lo stesso su una rotta lunga un quarto della circonferenza della terra (10 000 km).

Nave Roll-on/roll-off Le navi di Wilh. La compagnia marittima Wilhelmsen effettua la consegna di merci con un costo energetico compreso tra 0.028 e 0.05 kWh/t-km [`5ctx4k`].

102 *la fornitura di acqua e il trattamento delle acque reflue costano 0.4 kWh/gg a persona.* L'energia totale consumata dall'industria dell'acqua negli anni 2005–6 è stata di 7703 GWh. La fornitura di 1 m^3 di acqua ha un costo energetico di 0.59 kWh. Il trattamento di 1 m^3 di acque reflue ha un costo energetico di 0.63 kWh. Per il lettore interessato alle emissioni di gas ad effetto serra, la fornitura di acqua presenta un impatto di 289 g CO_2 per m^3 di acqua, e il trattamento delle acque di scarico 406 g CO_2 per m^3 di acque reflue.
Il consumo domestico di acqua è di 151 litri al giorno per persona. Il consumo totale di acqua è di 221 l/gg a persona. Le perdite ammontano a 57 litri al giorno per persona. Fonti: Parliamentary Office of Science and Technology [Ufficio parlamentare della Scienza e della Tecnologia. (N.d.T.)] [`www.parliament.uk/documents/upload/postpn282.pdf`], Water UK (2006).

– *I supermercati nel Regno Unito consumano 11 TWh/anno.* [`yqbzl3`]

103 *Dieter Helm e i suoi colleghi di Oxford stimano che l'impatto della Gran Bretagna sulle emissioni sia quasi* raddoppiato, *ossia divenga circa pari a 21 tonnellate, considerando le cose importate ed esportate.*
Helm et al. (2007).

16 Geotermico

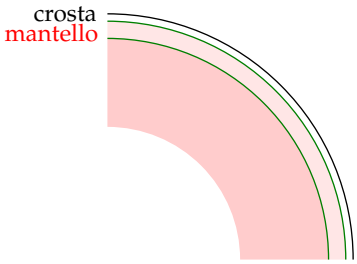


Figura 16.1. Sezione della Terra.

L'energia geotermica ha due origini: il decadimento degli elementi radioattivi presenti nella crosta terrestre e il calore rilasciato lentamente attraverso il mantello dal nucleo della terra. Questo calore al centro esiste perchè la terra era molto calda e sta ancora raffreddandosi e solidificandosi; al calore del nucleo si aggiunge anche quello dovuto alla forza gravitazionale a cui è sottoposta la terra dalla luna e dal sole, nello stesso modo in cui un'arancia cambia forma se la si comprime e la si strofina tra le mani.

La geotermia è un'attrattiva forma di energia rinnovabile perchè è "sempre disponibile" indipendentemente dalle condizioni meteorologiche; se costruissimo centrali geotermiche potremmo accenderle e spegnerle in modo tale da seguire la domanda.

Quanto vale la potenza geotermica disponibile sulla Terra? Per valutarla potremo distinguerla in due: quella disponibile in un qualsiasi luogo della crosta terrestre e quella presente in speciali punti caldi come l'Islanda (figura 16.3) [in questo caso i campi geotermici sono associati alla presenza di fenomeni magmatici dovuti a vari processi geodinamici delle placche. In Italia esiste a Larderello uno dei più grandi campi geotermici al mondo. (N.d.T.)]. Mentre il posto giusto per sviluppare la tecnologia geotermica è senza dubbio rappresentato dai punti caldi, si può pensare che la maggior parte del potenziale totale possa provenire da punti qualunque in quanto molto più numerosi.

Figura 16.2. Un granito.

Il fattore che limita la *sostenibilità* dell'energia geotermica è che la velocità alla quale il calore si trasmette attraverso le rocce dall'interno della terra verso la superficie è limitata e quindi il calore si riesce ad estrarlo solo solo ad un tasso limitato. È come quando si beve il liquido da una granita con una cannuccia. Alla prima sorsata si riesce a succhiare una notevole quantità di liquido freddo e piacevole. In seguito, continuando così, si arriverà solo a succhiare aria. Infatti, se ad un certo punto tutto il liquido disponibile sarà completamente estratto, ciò significa che l'iniziale tasso di estrazione non era sostenibile.

In maniera analoga, ci si potrebbe domandare se è possibile produrre una potenza illimitata se si riuscisse ad inserire una "cannuccia" per 15 km verso il centro della Terra e ci si accorgesse che c'è, calore sufficiente per far bollire l'acqua e quindi, inserendo due cannucce, si riuscisse, con la prima, a pompare acqua fredda in profondità e, con la seconda, ad estrarre il vapore necessario a far funzionare una centrale. Come nell'esperienza con la granita, la risposta è negativa. Infatti, dopo un po', il pompaggio non sostenibile di calore dalla roccia determinerebbe una riduzione della temperatura della roccia stessa fino a richiedere di aspettare un certo tempo prima che la roccia alla base della cannuccia si scaldi di nuovo. Si potrebbe avere lo stesso atteggiamento verso l'energia geotermica così estratta che si ha verso i combustibili fossili: ovvero considerarla

Figura 16.3. Impianto geotermico in Islanda. La produzione di elettricità geotermica media in Islanda (popolazione: 300 000 abitanti) nel 2006 è stata di 300 MW (24 kWh/gg per persona). Più della metà dell'elettricità dell'Islanda è usata per la produzione di allumininio. Inoltre, il calore geotermico risponde alla domanda nazionale di riscaldamento ed acqua calda per circa un 87% Foto di Gretar Ívarsson.

come una risorsa da estrarre in un dato tempo piuttosto che estrarla in modo sostenibile. Pensare il calore geotermico in questo modo potrebbe essere meglio per il nostro pianeta piuttosto che sfruttare in maniera non sostenibile i combustibili fossili. In realtà, sarebbe solo un diverso modo di concedere al genere umano altri 100 anni di autonomia energetica comunque insostenibile. L'interesse di questo libro, come già dichiarato nel titolo, è l'individuazione di risorse energetiche *sostenibili*. Nei paragrafi seguenti saranno presentati i numeri.

Stima dell'energia geotermica che potrebbe essere disponibile per sempre

Per prima cosa si supponga di poter sfruttare l'energia geotermica in maniera sostenibile inserendo un tubo ad una profondità appropriata e pompando *gradualmente* calore. Questo significa farlo ad un tasso tale che le rocce alla base del tubo non perdano irrimediabilmente calore ed è possibile solo se l'estrazione del calore avviene allo stesso tasso con cui questo fluisce naturalmente dal centro della terra verso la superficie. Come riportato all'inizio del capitolo, l'energia geotermica proviene da due sorgenti: dal decadimento radioattivo nella crosta terrestre e dal calore rilasciato dal nucleo della terra attraverso il mantello. In una zona media di un continente il flusso di calore proveniente dal centro della terra attraverso il mantello è circa 10 mW/m^2. Il flusso di calore alla superficie è 50 mW/m^2. A questo flusso si devono aggiungere ulteriori 40 mW/m^2 dovuti al calore radioattivo.

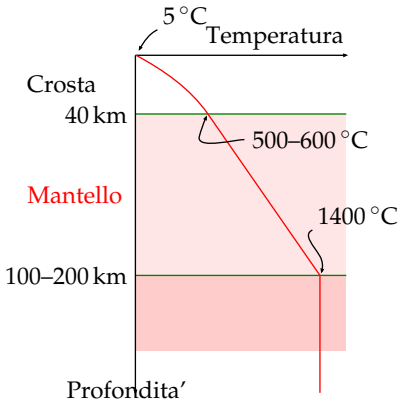


Figura 16.4. Profilo di temperatura in una zona media di un continente.

Un milliwatt (1 mW) è 0.001 W.

Quindi in un qualunque luogo, la potenza teorica massima che si potrebbe ottenere per unità di area sarebbe circa 50 mW/m^2. Ma questa potenza non rappresenta un fonte di energia primaria, quanto piuttosto di un calore di scarto che dovrebbe avere una temperatura superiore a quell'ambiente se si volesse produrre energia. Per questo motivo è necessario andare in profondità dove la temperatura aumenta come mostrato in figura 16.4 e dove a 40 km sotto terra si raggiungono circa 500 °C. Esiste una profondità ottimale per l'estrazione del calore compresa tra 0 km e 40 km in cui il flusso di calore e la temperatura della roccia si bilanciano: infatti vicino alla superficie il flusso di calore è massimo ma la temperatura della roccia è troppo bassa mentre a profondità più elevate le rocce sono più calde ma il flusso di calore è 5 volte più piccolo (a causa del minore contributo di calore prodotto dal decadimento radioattivo). La profondità ottimale dipende dal tipo di pompaggio e dal tipo di macchinari utilizzati per produrre energia. Supponendo di avere un motore ideale in grado di trasformare il calore in elettricità e che sia possibile perforare a qualunque profondità senza badare a spese, allora è possibile stimare la massima potenza estraibile in maniera sostenibile alla profondità ottimale. Sulla base del profilo di temperatura mostrato in figura 16.4, si può calcolare una profondità ottimale di circa 15 km. In queste condizioni, una macchina di calore ideale dovrebbe produrre 17 mW/m^2. Considerando la densità di popolazione mondiale di 43 persone per km quadrato, questo dato si traduce in 10 kWh per persona al giorno, se *tutta* la superficie terrestre venisse utilizzata. Nel Regno Unito, la densità di popolazione è 5 volte superiore [in Italia 4 volte superiore. (N.d.T.)], per cui la potenza geotermica su vasta scala di questa risorsa disponibile per sempre può offrire al massimo 2.5 kWh per persona al giorno.

Questo numero rappresenta la quantità di energia prodotta in maniera sostenibile per sempre, ignorando i punti caldi, utilizzando stazioni energetiche perfette e ipotizzando che si possa liberamente perforare fino alla profondità di 15 km ogni metro quadrato della superficie terrestre.

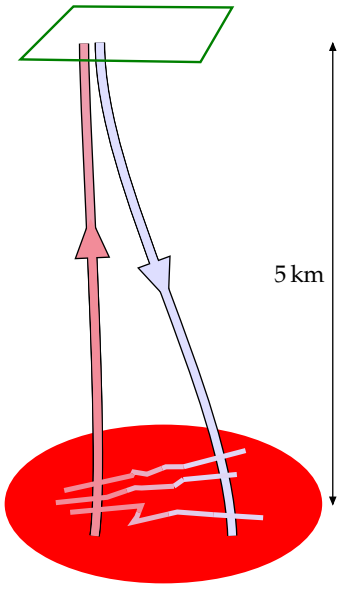
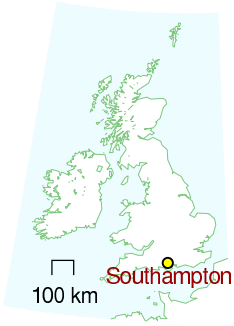


Figura 16.5. Avanzata estrazione geotermica da rocce calde anidre. Un pozzo è perforato e pressurizzato per creare fratture. Un secondo pozzo viene perforato nella porzione più lontana dalle fratture. Quindi acqua fredda viene pompata in basso in un pozzo e acqua calda (in realtà vapore) viene estratta dall'altro.

Energia geotermica come estrazione

L'altra strategia geotermica è quella di trattare il calore come fosse una risorsa da estrarre. Nell'"estrazione geotermica avanzata" da rocce calde anidre (figura 16.5), prima perforiamo un pozzo a profondità di 5 o 10 km e fratturiamo le roccia immettendo acqua. (Questa operazione può generare terremoti che non sono ben visti dalle popolazioni locali). Poi perforiamo un secondo pozzo nella zona fratturata. Alla fine immettiamo acqua in un pozzo ed estraiamo acqua sovrariscaldata o vapore dall'altro.

Questo calore può essere usato per ottenere elettricità o fornire calore. Qual'è la risorsa di rocce calde anidre nel Regno Unito? Purtroppo, il Regno Unito non ne è ben fornito. Gran parte delle rocce calde sono concentrate in Cornovaglia dove alcuni esperimenti geotermici sono stati



condotti nel 1985 in un centro di ricerca, attualmente chiuso, a Rosemanowes. Gli esperti che hanno condotto gli esperimenti hanno concluso che è improbabile che "la generazione di elettricità da rocce calde anidre sia tecnicamente o commercialmente valida in Cornovaglia o altrove in Gran Bretagna nel breve-medio periodo." Tuttavia, quanto vale questa fonte? La stima più ottimista basate sulle risorse di rocce calde anidre presenti nel Regno Unito è di 130 000 TWh che, secondo gli esperti, potrebbe contribuire quindi, in linea di principio, a 1.1 kWh al giorno per persona di elettricità per i prossimi 800 anni.

Altri posti nel mondo hanno risorse di rocce calde anidre molto più promettenti, quindi, volendo conoscere le risposte geotermiche di altri paesi, è necessario fare degli studi locali. Ma purtroppo per la Gran Betagna, l'energia geotermica giocherà solo un piccolo ruolo.

Ma a Southampton non si usa già l'energia geotermica? Quanto produce?

Vero, il Southhampton Geothermal Heating District Heating Scheme [Distretto Geotermico di Southampton. (N.d.T.)] era, almeno nel 2004, il solo impianto di riscaldamento distrettuale geotermico nel Regno Unito. Fornisce alla città acqua calda. Il pozzo geotermico è parte di un sistema combinato che fornisce, da un lato, acqua riscaldata e raffreddata agli utenti locali e, dall'altro, elettricità alla rete elettrica nazionale. L'energia geotermica contribuisce a circa 15% dei 70 GWh di calore prodotto per anno da questo sistema. La popolazione di Southampton era secondo l'ultimo censimentoè di 217 445 abitanti. In questo modo la potenza geotermica prodotta diventa di **0.13 kWh/gg** per persona.

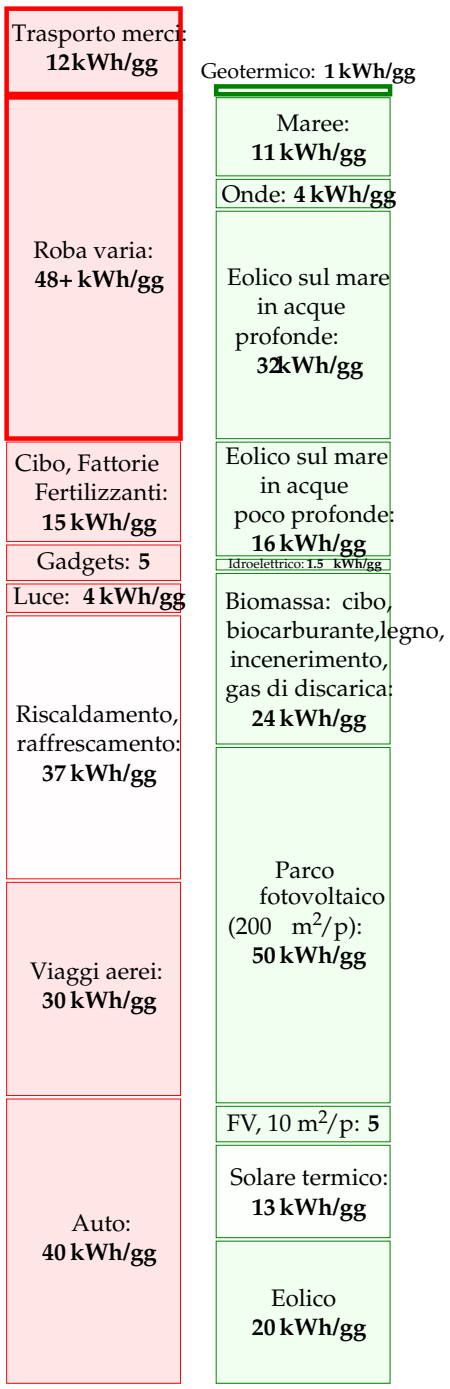


Figura 16.6. Geotermica.

Note e approfondimenti

p.

107 *Il flusso di calore alla superficie è di 50 mW/m²*. L'articolo Massachusetts Institute of Technology (2006) riporta che negli USA il valore medio è di 59 mW/m² con una variazione da 25 mW a 150 mW. Shepherd (2003) riporta come valore medio 63 mW/m².

109 *"Generazione di potenza elettrica da rocce calde anidre è improbabile che sia tecnicamente a commercialmente valida in UK"*. Tratto da MacDonald et al. (1992). Vedi anche Richards et al. (1994).

– *La stima più ottimista basate sulle risorse di rocce calde anidre presenti nel Regno Unito . . . potrebbe contribuire quindi, in linea di principio, a 1.1 kWh al giorno per persona di elettricità per i prossimi 800 anni*. Tratto da MacDonald et al. (1992).

– *Altri posti nel mondo hanno rocce calde anidre più promettenti*. C'è un ottimo studio (Massachusetts Institute of Technology, 2006) che descrive le risorse di rocce calde anidre degli USA. Un altro approccio più speculativo, basato sulle ricerche del Sandia National Laboratories fatte negli anni settanta, sarebbe quello di perforare fino alle temperature del magma di 600–1300 °C forse a profondità di 15 km, e ottenere energia. Il sito web `www.magma-power.com`

stima che il calore nei corpi magmatici sotto il territorio degli Stati Uniti di America dovrebbe coprire il consumo di energia nazionale per 500 o 5000 anni e che si potrebbe estrarre in maniera economicamente vantaggiosa.

109 *Impianto di produzione di calore del Distretto Geotermico di Southampton*. `www.southampton.gov.uk`.

17 Servizi pubblici

Ogni pistola fabbricata, ogni nave da guerra varata, ogni razzo sparato significano, alla fine, un furto a coloro i quali hanno fame e non sono nutriti, hanno freddo e non sono vestiti.

Questo mondo in armi non sta spendendo solo soldi. Si sta spendendo il sudore dei suoi operai, il genio dei suoi scienziati, le speranze dei suoi figli.

Presidente Dwight D. Eisenhower – Aprile, 1953

Il costo energetico della "difesa"

Proviamo a fare una stima di quanta energia spendiamo per i nostri apparati militari.

Nel 2007–8, la frazione di spesa del Governo centrale britannico finita alla difesa ammontava a £33 mld/£587 mld = 6%. Se includiamo la spesa del Regno Unito in materia di antiterrorismo e di servizi segreti (£2.5 mld ed in aumento), il totale per le attività di difesa diviene 36 miliardi di sterline.

Come stima grezza potremmo immaginare che il 6% di questi £36 mld sia speso in energia ad un costo di 2.7p per kWh. (6% è la frazione del PIL che viene spesa per l'energia, mentre 2.7p è il prezzo medio dell'energia). Ne risulta che circa 80 TWh all'anno di energia finiscono nella difesa: fabbricare proiettili, bombe, armamenti nucleari; costruire dispositivi con cui lanciare, sparare e piazzare tutti questi proiettili e bombe, e ruggire intorno mantenendosi in assetto per la prossima battaglia del Bene contro il Male. Nelle nostre unità preferite, questo corrisponde a 4 kWh al giorno per persona.

Il costo dell'apparato difensivo nucleare

Gli oneri finanziari degli Stati Uniti per la fabbricazione e la distribuzione di armi nucleari nel periodo 1945-1996 sono stati pari a 5.5 trilioni di dollari (dollari del 1996) [in tutto il libro un trilione è un milione di milioni, come da standard USA – divenuto da qualche tempo di uso comune anche nel Regno Unito, lo è sempre di più a livello internazionale, nonostante la notevole discrepanza con il SI. (N.d.T.)].

La spesa per gli armamenti nucleari ha superato in questo periodo il totale dell'insieme delle spese federali concernenti l'istruzione, l'agricoltura, la formazione, l'occupazione ed i servizi sociali, le risorse naturali e l'ambiente, la scienza in generale, lo spazio e la tecnologia, lo sviluppo comunitario e regionale (tra cui le operazioni di soccorso in caso di catastrofe), l'applicazione della legge, la produzione di energia e la regolamentazione.

Se ancora una volta si assume che il 6% di questa spesa se ne sia andato in energia ad un costo di 5¢ per kWh, troviamo che il costo energetico del possedere armi nucleari è stato pari a 26 000 kWh per Americano, ossia 1.4 kWh al giorno per Americano (condiviso tra 250 milioni di Americani per 51 anni).

Quale energia sarebbe stata consegnata ai fortunati destinatari, nel caso in cui tutte quelle armi nucleari fossero state usate? Le energie delle più grandi armi termonucleari sviluppate da USA ed URSS vengono misurate in megatoni di TNT. Una tonnellata di TNT equivale a 1200 kWh. La bomba che distrusse Hiroshima aveva un'energia pari a 15 000 tonnellate di TNT (18 mln kWh). Una bomba da un *megatone* fornisce un'energia di 1.2 mld kWh. Se lasciata cadere su di una città da un milione di abitanti, una bomba da un megatone elargisce una donazione di energia pari a 1200 kWh a persona, il che equivale a 120 litri di benzina a persona. L'energia totale dell'odierno arsenale nucleare degli USA è di 2400 megatoni, contenuta in 10 000 testate. Nei bei vecchi tempi andati, quando la gente prendeva veramente sul serio la difesa, l'energia dell'arsenale era di 20 000 megatoni. Queste bombe, se utilizzate, avrebbero consegnato un'energia di circa 100 000 kWh per Americano. Questo è equivalente a 7 kWh al giorno per persona per una durata di 40 anni – del tutto simile all'intero ammontare dell'energia elettrica fornita in America da fonte nucleare.

Costo energetico dei materiali per la produzione di bombe nucleari

I principali materiali nucleari sono il plutonio, di cui gli Stati Uniti hanno prodotto 104 t, e l'uranio ad alto arricchimento (HEU), di cui gli Stati Uniti hanno prodotto 994 t. La produzione di questi materiali richiede energia.

Gli impianti per la produzione di plutonio più efficienti usano 24 000 kWh di calore durante la fabbricazione di 1 grammo di plutonio. Pertanto il costo energetico diretto per la produzione delle 104 tonnellate di plutonio degli USA (1945–1996) è stato almeno di 2.5 trilioni di kWh il che vale a dire 0.5 kWh al giorno per persona (se condivisi tra i 250 milioni di Americani).

La principale voce di costo in termini di energia nella produzione di uranio altamente arricchito è quella inerente l'arricchimento. È necessario del lavoro per separare gli atomi ^{235}U e ^{238}U nell'uranio naturale, allo scopo di creare un prodotto finale che sia più ricco di ^{235}U. La produzione degli Stati Uniti di 994 tonnellate di uranio altamente arricchito (totale USA, 1945–1996) ha avuto un costo energetico di circa 0.1 kWh al giorno per persona.

> *"Trident crea posti di lavoro." Bene, lo stesso vale se rivestiamo con l'amianto le nostre scuole, ma questo non significa che lo dobbiamo fare!*
>
> Marcus Brigstocke

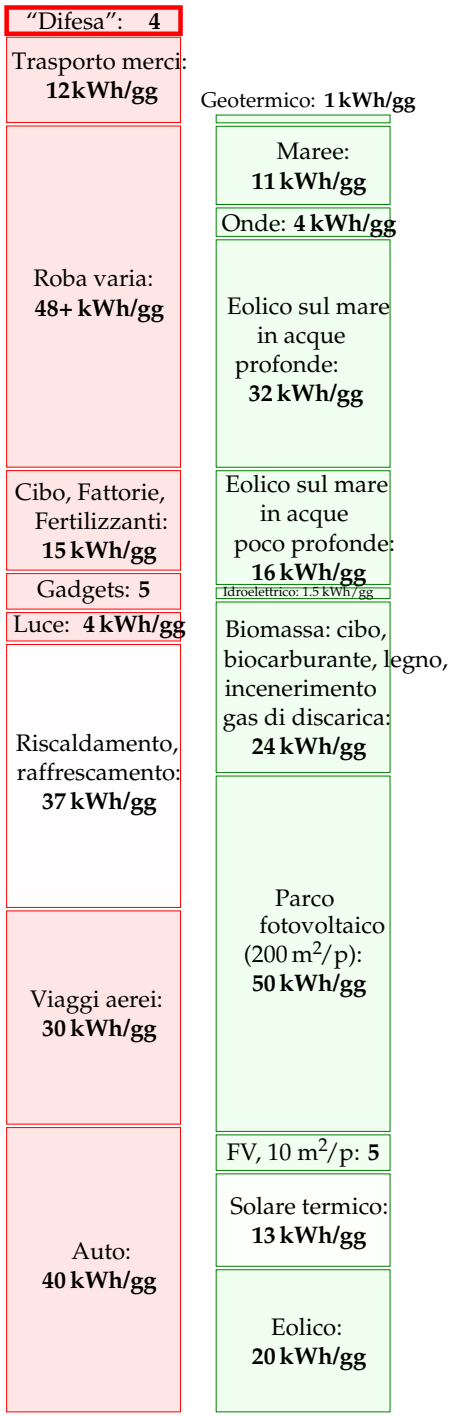


Figura 17.1. Il costo energetico della difesa del Regno Unito è stimato in circa 4 kWh al giorno per persona.

Università

Secondo il Times Higher Education Supplement (30 Marzo 2007), le università del Regno Unito utilizzano 5.2 miliardi di kWh l'anno. Suddivisi tra tutta la popolazione, significano una potenza di 0.24 kWh al giorno per persona.

Quindi, l'istruzione superiore e la ricerca sembrano avere un costo energetico molto più basso dei giochi di guerra difensiva.

Possono anche esservi altri servizi pubblici che consumano energia di cui potremmo parlare, ma a questo punto vorrei concludere la nostra gara tra le pila rossa e quella verde.

Note ed approfondimenti

p.

111 *Bilancio energetico militare*. Il bilancio del Regno Unito è disponibile all'indirizzo [yttg7p]; la difesa riceve £33.4 mld [fcqfw], intelligence ed antiterrorismo £2.5 mld all'anno [2e4fcs]. In accordo a quanto riportato a pagina 14 del Piano Spese del Governo 2007/08 [33x5kc], il "bilancio totale delle risorse" del Dipartimento della Difesa è una somma più grande, £39 mld, dei quali £33.5 mld vanno alla "fornitura di capacità difensiva" e £6 mld a retribuzioni e pensioni delle forze armate ed alle pensioni di guerra. Si può trovare una ripartizione di tale bilancio qui: [35ab2c]. Si vedano, inoltre, [yg5fsj], [yfgjna] e www.conscienceonline.org.uk.
I consumi energetici dell'apparato militare statunitense sono di pubblico dominio: "Il Dipartimento della Difesa Questa cifra descrive l'uso diretto di combustibile e di energia elettrica e non include l'energia incorporata nei giocattoli dei militari. Dividendo per la popolazione degli Stati Uniti, pari a 300 milioni, si ottengono 1.7 kWh/gg a persona.

– *Gli oneri finanziari per gli USA inerenti la produzione e distribuzione degli armamenti nucleari dal 1945 al 1996 sono stati pari a 5.5 trilioni di dollari (in dollari del 1996)*. Fonte: Schwartz (1998).

112 *Il costo energetico della produzione del plutonio*. [slbae].

– *La produzione da parte degli USA di 994 tonnellate di HEU...* Il materiale arricchito tra il 4% e il 5% di ^{235}U viene chiamato uranio a basso arricchimento (LEU). L'uranio arricchito al 90% viene chiamato uranio ad alto arricchimento (HEU). Occorre tre volte tanto lavoro per arricchire l'uranio dal suo stato naturale al 5% (LEU) di quanto ne occorra per arricchire il LEU al 90% (HEU). L'industria nucleare misura queste esigenze energetiche in unità di lavoro separativo (ULS). Produrre un chilogrammo di ^{235}U per il livello HEU richiede 232 ULS. Per fare 1 kg di ^{235}U per il LEU (dove 1 kg va ad arricchire 22.7 kg) sono richieste circa 151 ULS. In entrambi i casi si parte da uranio naturale (0.71% ^{235}U) e si scarta l'uranio impoverito contenente 0.25% ^{235}U.
Il mercato commerciale del combustibile nucleare apprezza un ULS a circa $100. Ci vogliono circa 100 000 ULS di uranio arricchito per alimentare un tipico reattore nucleare commerciale da 1000 MW per un anno. Sono attualmente in commercio due metodi di arricchimento dell'uranio: diffusione gassosa e centrifuga a gas. Il processo di diffusione gassosa consuma circa 2500 kWh per ULS, mentre i moderni impianti di centrifughe a gas richiedono solo circa 50 kWh per ULS. [yh45h8], [t2948], [2ywzee]. Una moderna centrifuga produce circa 3 ULS all'anno.
La produzione da parte degli Stati Uniti di 994 tonnellate di uranio altamente arricchito (totale USA, 1945–1996) è costata 230 milioni di ULS, il che significa 0.1 kWh/gg a persona (assumendo che gli Americani siano 250 milioni, e l'utilizzo di 2500 kWh/ULS quale costo dell'arricchimento a diffusione).

18 Vivere grazie alle rinnovabili?

La pila rossa in figura 18.1 ammonta a 195 kWh al giorno per persona. Quella verde arriva a circa 180 kWh/gg/p. Una gara combattuta! Ma ricordate: per calcolare il nostro blocco di produzione abbiamo buttato al vento tutti i vincoli economici, sociali ed ambientali. Inoltre, alcuni dei nostri contributi verdi sono probabilmente incompatibili tra di loro: i nostri pannelli fotovoltaici ed i pannelli per l'acqua calda si scontrerebbero gli uni con gli altri sui tetti, e i nostri parchi solari fotovoltaici, che utilizzano il 5% del Paese, potrebbero competere con le colture energetiche, con le quali abbiamo coperto il 75% dello stesso Paese. Se dovessimo perdere anche solo uno dei nostri contributi verdi più grandi – per esempio, se decidessimo che l'eolico offshore in acque profonde non è un'opzione, o che la pannellatura del 5% del Paese a base di fotovoltaico ad un costo di £200 000 a persona non è "in" – allora la pila della produzione non farebbe più scopa con quella del consumo.

Inoltre, anche se la nostra pila rossa del consumo fosse risultata inferiore rispetto a quella verde della produzione, non significherebbe necessariamente che i nostri conti energetici stiano tornando. Non si può alimentare un televisore con il cibo per gatti, né è possibile alimentare un gatto con una turbina eolica. L'energia esiste in forme diverse – chimica, elettrica, cinetica e calore, per esempio. Per un piano energetico sostenibile e che faccia la differenza, affinché i conti tornino, abbiamo bisogno che il consumo e la produzione di energia siano abbinabili sia per forma che per quantità. Convertire energia da una forma all'altra – da chimica ad elettrica, come in una centrale a combustibili fossili o da elettrica a chimica, come in una fabbrica di idrogeno prelevato dall'acqua – di solito comporta notevoli perdite di energia utile. Torneremo su questo importante dettaglio nel Capitolo 27, che descriverà alcuni piani energetici dove i conti tornano.

Là rifletteremo sulle nostre stime di consumo e produzione, confrontandole con le medie ufficiali e con le stime di altre persone, e discuteremo di quanta potenza le fonti rinnovabili potrebbero plausibilmente erogare in un Paese come la Gran Bretagna.

Le domande che ci rivolgiamo in questo capitolo sono:

1. Le dimensioni della pila rossa sono approssimativamente corrette? Qual è il consumo *medio* della Gran Bretagna? Esamineremo i numeri ufficiali concernenti i consumi energetici della Gran Bretagna ed alcuni altri Paesi.

2. Sono stato ingiusto con le rinnovabili, sottovalutando il loro potenziale? Confronteremo le stime nella pila verde con quelle pubblicate da organizzazioni come la Commissione per lo Sviluppo Sostenibile, l'Institution of Electrical Engineers ed il Centre for Alternative Technology.

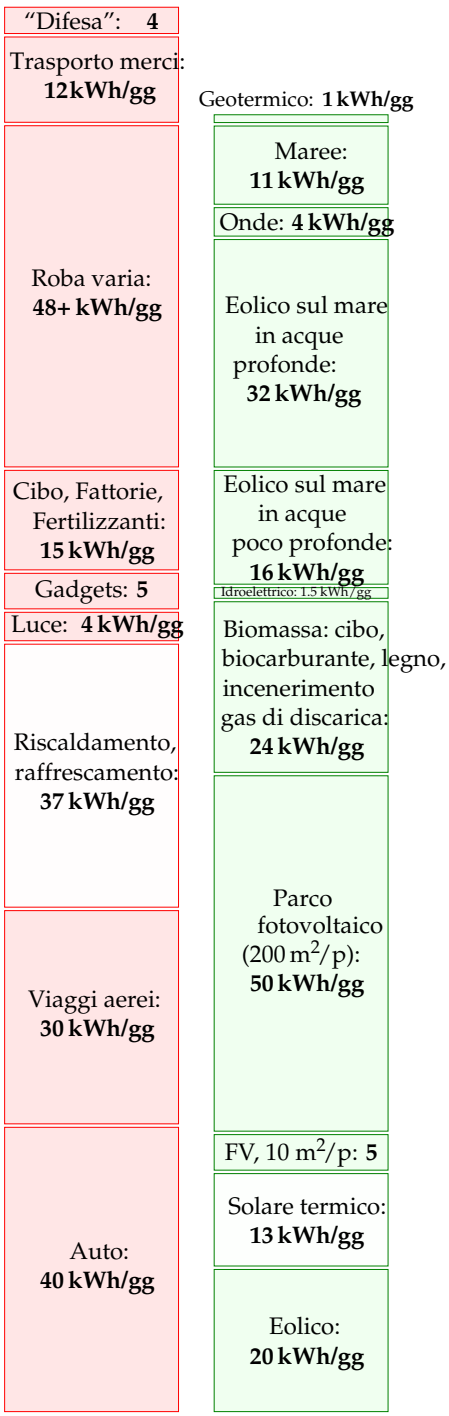


Figura 18.1. Il punto della situazione dopo che abbiamo aggiunto tutte le fonti rinnovabili tradizionali.

3. Cosa succede alla pila verde quando prendiamo in considerazione vincoli sociali ed economici?

Riflessioni rosse

Le nostre stime del consumo tipico di una persona benestante (figura 18.1) hanno raggiunto i 195 kWh al giorno. È pur vero che mentre molte persone usano questa quantità di energia, molti di più aspirano a tali livelli di consumo. L'Americano *medio* consuma circa **250 kWh al giorno**. Se tutti alzassimo il nostro livello di consumo a quello medio americano, la pila della produzione verde risulterebbe sicuramente sminuita da quella rossa del consumo.

Che dire dell'Europeo medio e del Britannico medio? Il consumo medio europeo di "energia primaria" (vale a dire l'energia contenuta nei combustibili grezzi, più eolico ed idroelettrico) è di circa 125 kWh al giorno per persona. Anche nel Regno Unito la media è 125 kWh al giorno per persona.

Queste medie ufficiali non includono due flussi di energia. In primo luogo, "l'energia incorporata" nella roba *importata* (l'energia spesa nel fabbricare le cose) risulta del tutto non inclusa. Abbiamo stimato nel Capitolo 15 che l'energia incorporata nella roba d'importazione ammonta ad almeno 40 kWh/gg per persona. In secondo luogo, le stime ufficiali del "consumo di energia primaria" includono solo i flussi di energia concernenti l'industria – cose tipo i combustibili fossili e l'energia idroelettrica – e non tengono traccia della naturale energia incorporata nei prodotti alimentari: l'energia che è stata originariamente imbrigliata dalla fotosintesi.

Un'altra differenza tra la pila dei blocchi rossi che abbiamo schiaffato assieme ed il totale nazionale è che finora nella maggior parte dei capitoli di consumo abbiamo cercato di ignorare l'energia persa nella conversione da una forma all'altra, e nel trasporto. Per esempio, la valutazione dell'"auto", in questa Parte I del libro, ha coperto solo l'energia della benzina, non l'energia utilizzata nella raffineria di petrolio dove si fa la benzina, e neppure l'energia utilizzata nel far viaggiare petrolio e benzina da A a B. Il totale nazionale rappresenta tutta l'energia, prima di eventuali perdite di conversione. Le perdite di conversione ammontano, infatti, a circa il 22% del consumo totale nazionale di energia. La maggior parte di

Figura 18.2. Il consumo di energia, ripartito per uso finale, secondo il Dipartimento del Commercio e dell'Industria.

Trasporto su gomma	Petrolio	22.5
Trasporto su rotaia	Petrolio	0.4
Trasporto via acqua	Petrolio	1.0
Trasporto aereo	Petrolio	7.4
Tutte le modalità	Elettricità	0.4
Tutta l'energia utilizzata dai mezzi		31.6

Tabella 18.3. 2006, ripartizione del consumo di energia per modalità di trasporto, in kWh/gg a persona. Fonte: Dept. for Transport (2007).

queste perdite di conversione avviene nelle centrali elettriche. Le perdite nella rete di trasmissione dell'elettricità tagliano via l'1% del totale dei consumi energetici nazionali. Nella costruzione della nostra pila rossa, abbiamo cercato di immaginare la quantità di energia che una tipica persona benestante utilizza. Questo approccio ha distorto la nostra percezione dell'importanza delle diverse attività? Diamo un'occhiata ad alcuni numeri ufficiali. La Figura 18.2 mostra la ripartizione del consumo di energia per uso finale. Le prime due categorie sono trasporti e riscaldamento (aria calda ed acqua calda). Queste due categorie hanno dominato anche la pila rossa di questa prima parte del libro. Ottimo.

Diamo un'occhiata più da vicino al trasporto. Nella nostra pila rossa, abbiamo scoperto che le impronte energetiche del guidare un'auto 50 km al giorno e del volare a Città del Capo una volta all'anno sono quasi uguali. La Tabella 18.3 mostra le importanze relative delle diverse modalità di

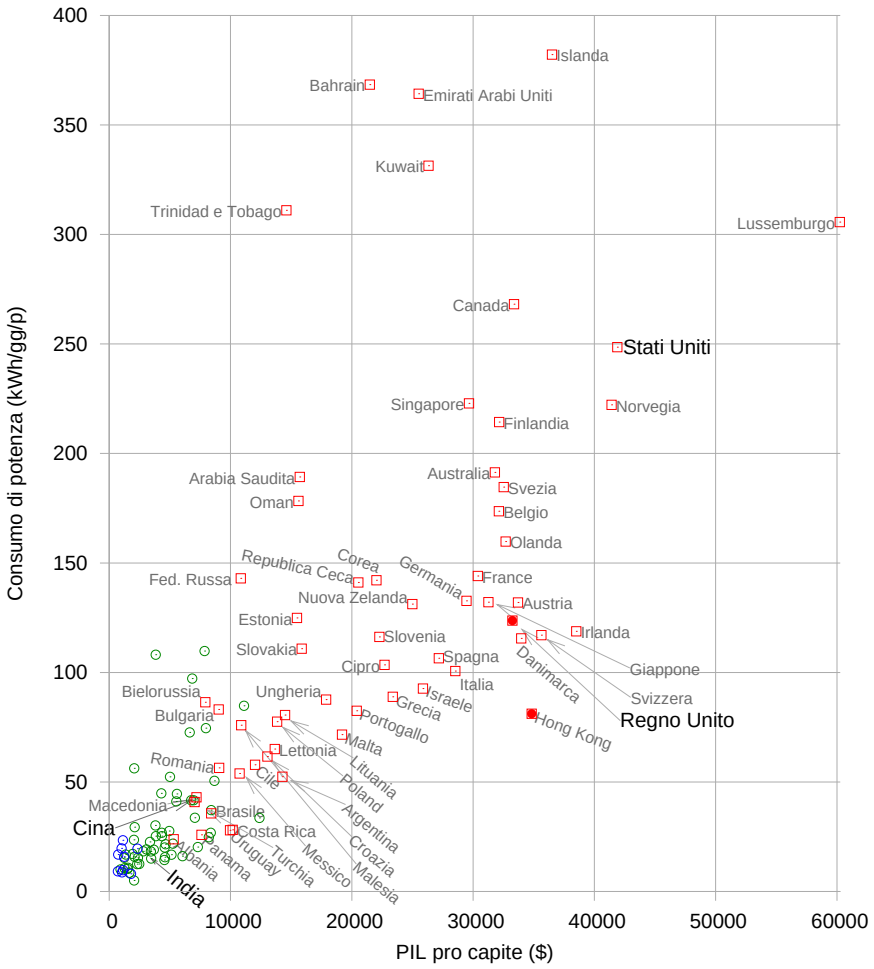


Figura 18.4. Consumo energetico pro-capite vs. PIL pro-capite, a parità di potere d'acquisto in dollari US. I quadrati indicano Paesi ad "alto sviluppo umano"; i cerchi, quelli a "medio" o "basso". La Figura 30.1 (p. 257) mostra gli stessi dati su scala logaritmica.

Figura 18.5. Hong Kong. Foto di Samuel Louie e Carol Spears.

trasporto nel bilancio nazionale. Nelle medie nazionali, l'aviazione risulta inferiore al trasporto su strada.

In che modo i dati ufficiali sul consumo della Gran Bretagna si confrontano con quelli di altri Paesi? La Figura 18.4 mostra i consumi di energia di un sacco di Paesi o regioni, contro il loro prodotto interno lordo (PIL). C'è un'evidente correlazione tra consumo di energia e PIL: più è alto il PIL di un Paese (pro capite), più è alto il consumo energetico pro capite. Il Regno Unito è un Paese ad alto PIL abbastanza tipico, circondato da Germania, Francia, Giappone, Austria, Irlanda, Svizzera e Danimarca. L'unica eccezione alla regola "un PIL grande implica un grande consumo di energia" è Hong Kong. Il PIL di Hong Kong pro capite è circa lo stesso della Gran Bretagna, ma il consumo energetico di Hong Kong è all'incirca 80 kWh/gg/p.

Il messaggio che recepisco da questo confronto tra Paesi è che il Regno Unito è un Paese europeo abbastanza tipico, e che quindi fornisce un buon caso di studio per porre la domanda: "come può un Paese con un'alta qualità della vita ottenere la sua energia in modo sostenibile?"

Riflessioni verdi

Spesso si dice che la Gran Bretagna ha abbondanza di energie rinnovabili. Sono stato avaro di verde? I miei numeri sono un carico di rifiuti? Ho sottovalutato la produzione sostenibile? Mettiamo a confronto i miei numeri verdi in primo luogo con diverse stime disponibili nella pubblicazione della Commissione per lo Sviluppo Sostenibile *Il ruolo del nucleare in un'economia a basse emissioni di carbonio. Ridurre le emissioni di CO_2 – il nucleare e le alternative.* Sorprendentemente, benché quanto assunto dalla Commissione per lo Sviluppo Sostenibile riguardo alle risorse sostenibili sia molto positivo ("Abbiamo enormi risorse in termini di maree, onde, biomasse e sole"), *tutte le stime nel documento della Commissione per lo Sviluppo Sostenibile sono inferiori alle mie!* (Per la precisione, tutte le stime del totale delle rinnovabili sono inferiori al mio totale). La pubblicazione da

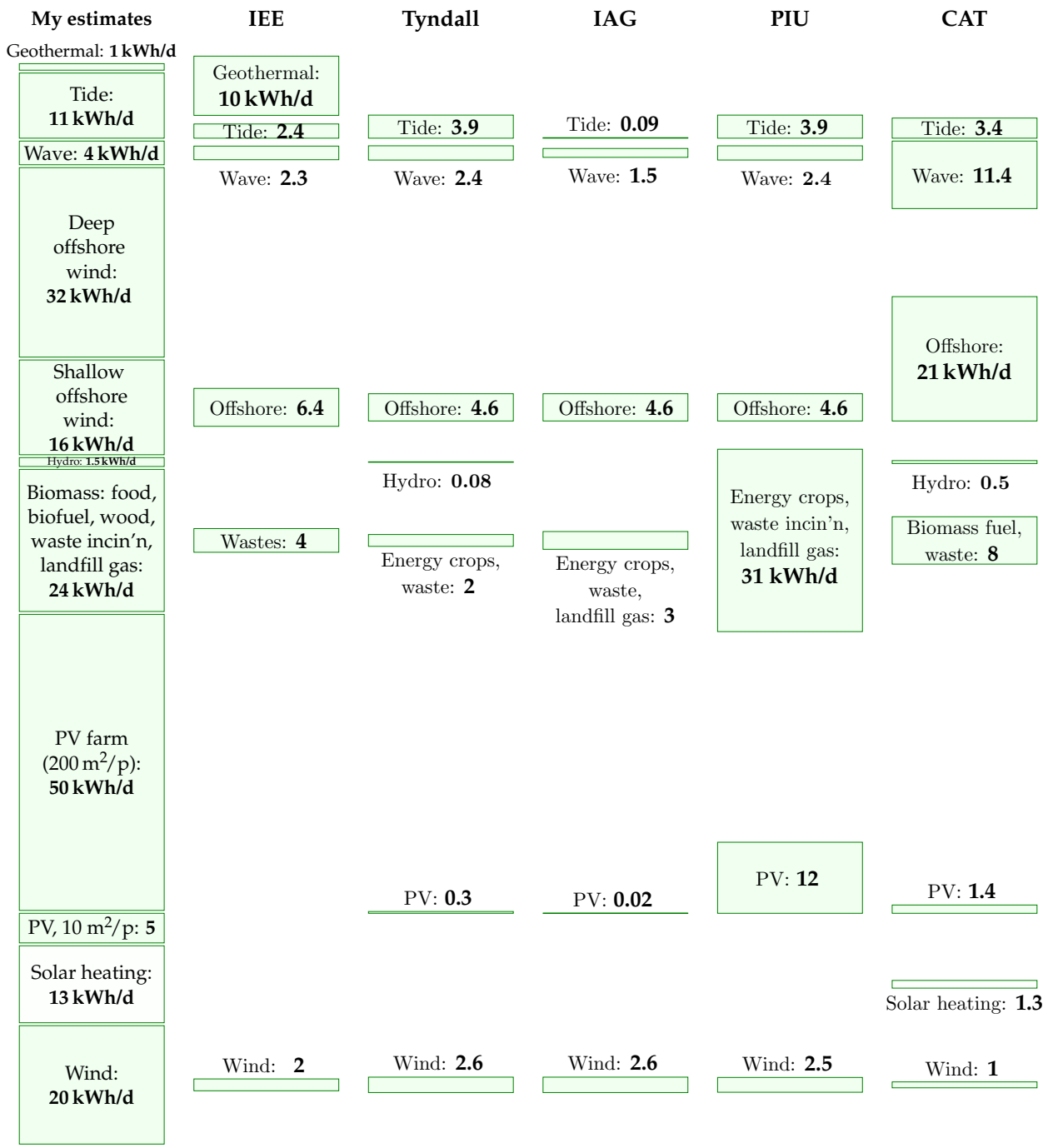


Figura 18.6. Stime sia teoriche che pratiche delle risorse rinnovabili nel Regno Unito, da parte dell'Institute of Electrical Engineers, del Tyndall Centre, degli analisti del Gruppo Interdipartimentale e della Performance and Innovation Unit, nonchè le proposte del Centro Tecnologie Alternative attinenti il piano "Isola Gran Bretagna" per il 2027.

parte della Commissione per lo Sviluppo Sostenibile fornisce stime a partire da quattro fonti qui di seguito dettagliate (IEE, Tyndall, IAG, e PIU). La Figura 18.6 mostra le mie stime accanto ai numeri di queste quattro fonti ed ai numeri del Centro per le Tecnologie Alternative (CAT). Ecco una descrizione di ciascuna fonte.

IEE L'Institute of Electrical Engineers ha pubblicato un rapporto sulle energie rinnovabili nel 2002 – una sintesi dei possibili contributi da fonti rinnovabili nel Regno Unito. La seconda colonna della figura 18.6 mostra il "potenziale tecnico" di una varietà di tecnologie rinnovabili per la produzione di energia elettrica nel Regno Unito – "un limite superiore che è improbabile sia mai superato anche a seguito di cambiamenti piuttosto drammatici nella struttura della nostra società e dell'economia". Secondo la IEE, il potenziale tecnico totale di tutte le energie rinnovabili è di circa 27 kWh/gg a persona.

Tyndall La stima del Tyndall Centre del totale praticabile in termini di risorsa rinnovabile di energia ammonta a 15 kWh al giorno per persona.

IAG Le stime del Gruppo Analisti Interdipartimentale inerenti le fonti rinnovabili tengono conto dei vincoli economici. La loro risorsa totale pratica *e* conveniente (ad un prezzo al dettaglio di 7p/kWh) è di 12 kWh al giorno per persona.

PIU La colonna "PIU" mostra "il potenziale indicativo delle risorse per le opzioni di generazione di elettricità da fonti rinnovabili" proveniente dal contributo del DTI alla revisione PIU del 2001. Per ciascuna tecnologia vi mostro il loro "massimo pratico" o, se non è stato dato il massimo pratico, il loro "massimo teorico".

CAT L'ultima colonna mostra i numeri del Centro Tecnologie Alternative per il piano "Isola Gran Bretagna" di Helweg-Larsen and Bull (2007).

Europa bio-alimentata

A volte la gente mi chiede: "ma non eravamo già abituati a vivere piuttosto bene grazie alle rinnovabili, di sicuro prima della rivoluzione industriale?". Sì, ma non dimenticate che due cose erano diverse allora: stili di vita e densità di popolazione.

Riportando le lancette dell'orologio indietro di oltre 400 anni, ecco un'Europa che vive quasi interamente su fonti sostenibili: prevalentemente legno e coltivazioni, aumentate da un po' di potenza eolica, delle maree e dell'acqua. È stato stimato che lo stile di vita della persona media consumasse allora una potenza di 20 kWh al giorno. Il legno utilizzato per persona era pari a 4 kg al giorno, il che richiedeva 1 ettaro (10 000 m^2) di foresta a persona. La superficie di territorio per abitante in Europa nel

1700 era di 52 000 m^2. Nelle regioni con la più alta densità di popolazione, la superficie per persona ammontava a 17 500 m^2 di terreni arabili, pascoli e boschi. Oggi la porzione di Gran Bretagna per persona è di appena 4000 m^2, pertanto, anche se ritornassimo allo stile di vita del Medioevo e ricoprissimo completamente il Paese di foreste, non potremmo più vivere, in modo sostenibile, qui. La nostra densità di popolazione è di gran lunga troppo elevata.

Le ambizioni verdi incontrano la realtà sociale

La Figura 18.1 è una notizia desolante. Sì, tecnicamente, la Gran Bretagna ha "grandi" rinnovabili. Ma, realisticamente, non credo che la Gran Bretagna possa vivere grazie alle proprie fonti rinnovabili – almeno non nel modo in cui attualmente viviamo. Sono in parte spinto a questa conclusione dal coro di opposizione che saluta ogni grande proposta energetica rinnovabile. La gente ama le energie rinnovabili, *a meno che non siano più grandi di una foglia di fico*. Se gli inglesi sono bravi in una cosa, è nel dire "no."

Parco eolico? "No, sono dei brutti cosi rumorosi."

Pannelli solari sui tetti? "No, rovinerebbero l'amenità della visuale della strada."

Più silvicoltura? "No, rovina la campagna."

Incenerimento dei rifiuti? "No, sono preoccupato per i rischi per la salute, la congestione del traffico, polvere e rumore."

Idroelettricità? "Sì, ma non quelle dighe *grandi* – ché danneggiano l'ambiente."

Eolico offshore? "No, sono più preoccupato per quelle brutte linee elettriche che arrivano a riva di quanto lo fossi riguardo ad un'invasione nazista."

Onde, geotermia? "No, troppo costoso."

Dopo tutte queste obiezioni, temo che il massimo che la Gran Bretagna possa mai ottenere da fonti rinnovabili potrebbe essere qualcosa di simile a ciò che è indicato in basso a destra della figura 18.7.

La Figura 18.8 offre una guida a chi cerca di costruire "fattorie del vento" in Gran Bretagna. Su di una mappa del continente britannico ho mostrato in bianco le zone di esclusione circondanti per un raggio di 2 km ogni borgo, villaggio e città. Queste aree bianche verrebbero presumibilmente precluse allo sviluppo di parchi eolici, dato che lì sarebbero troppo vicini agli esseri umani. Ho colorato di nero tutte le regioni che si trovano a *più di 2 km* da qualsiasi insediamento umano. Queste aree sono in gran parte escluse dallo sviluppo di parchi eolici perché sono *tranquille*, ed è essenziale proteggere i luoghi tranquilli dall'industrializzazione. Se si vuole

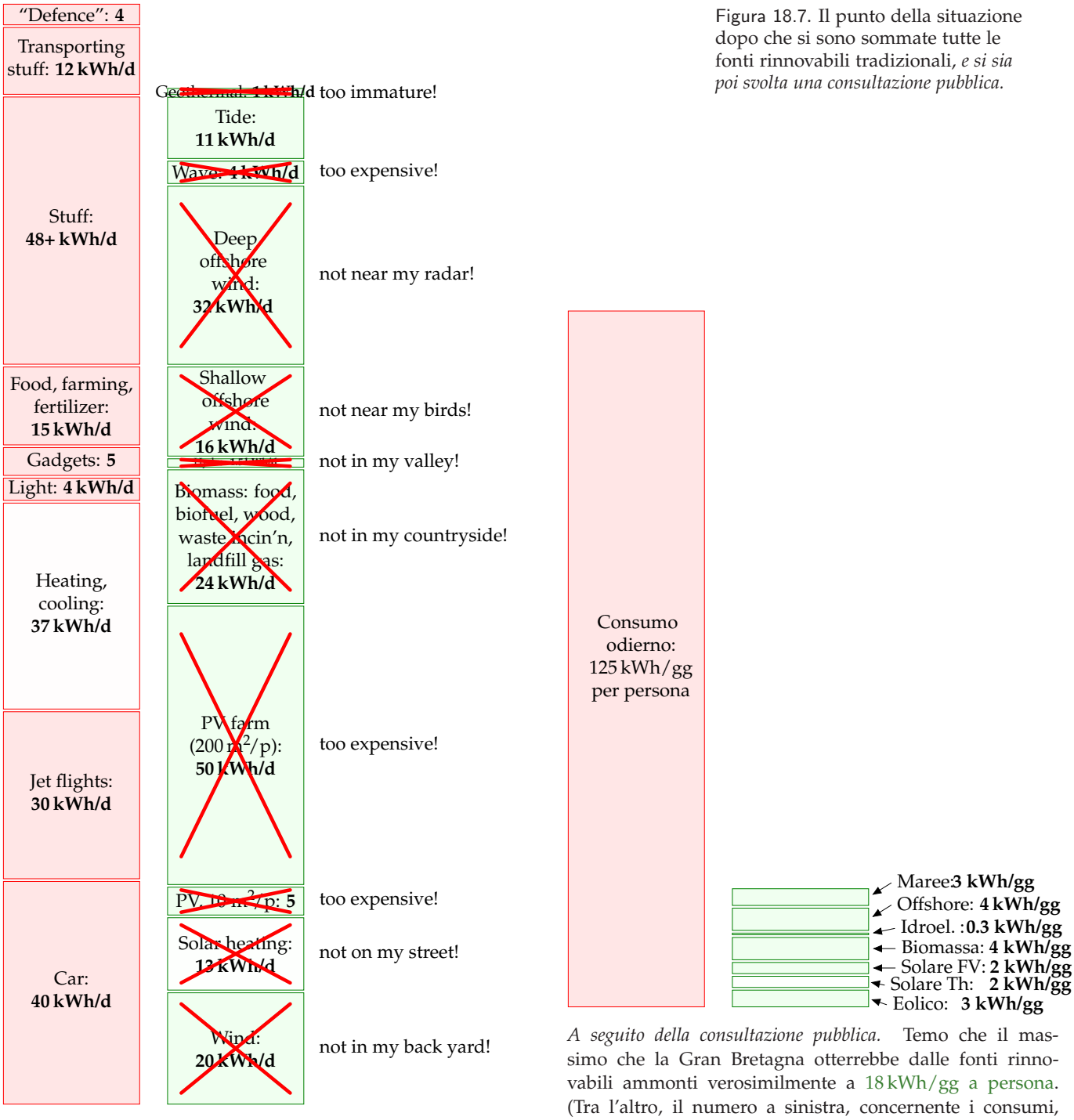


Figura 18.7. Il punto della situazione dopo che si sono sommate tutte le fonti rinnovabili tradizionali, *e si sia poi svolta una consultazione pubblica.*

A seguito della consultazione pubblica. Temo che il massimo che la Gran Bretagna otterrebbe dalle fonti rinnovabili ammonti verosimilmente a 18 kWh/gg a persona. (Tra l'altro, il numero a sinistra, concernente i consumi, 125 kWh/gg a persona, è il consumo medio britannico, escludendo le importazioni, ed ignorando l'energia solare acquisita attraverso la produzione alimentare.)

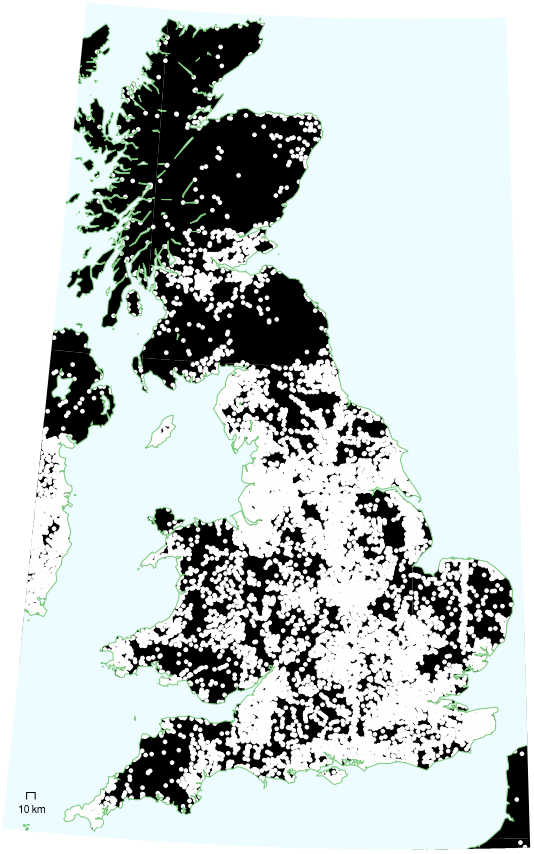


Figura 18.8. Là dove stanno le cose selvagge. Uno dei motivi di contestazione delle centrali eoliche è il rumore che producono. Ho tritato questa mappa del continente britannico tirandone fuori una zona di esclusione del raggio di 2 km, circondante ogni borgo, villaggio e città. Queste aree bianche verrebbero con ogni probabilità escluse dallo sviluppo di parchi eolici. Le restanti aree nere sarebbero forse anch'esse in gran parte escluse a causa della necessità di tutelare i posti tranquilli dall'industrializzazione. Per i dati inerenti l'insediamento: `www.openstreetmap.org`.

evitare obiezioni al parco eolico, scegliere qualsiasi pezzo di terra che non sia di colore nero o bianco.

> *Alcuni di questi ambientalisti, che hanno buon cuore, ma menti confuse, formano in pratica una barriera contro la lotta al cambiamento climatico.*
>
> Malcolm Wicks, Ministro di Stato per l'Energia

Ci avviamo verso la chiusura della Parte I. Il presupposto era che vogliamo sbarazzarci dei combustibili fossili, per una o più delle ragioni elencate nel Capitolo 1 – il cambiamento climatico, la sicurezza dell'approvvigionamento, e così via. La Figura 18.9 mostra quanta potenza otteniamo attualmente dalle fonti rinnovabili e nucleari. Essa ammonta a solo il 4% del nostro consumo totale.

Le due conclusioni che possiamo trarre dalla Parte I sono:

1. *Per fare la differenza, gli impianti delle rinnovabili debbono assumere le dimensioni di Paesi.* Ogni impianto di rinnovabili, per dare un contributo paragonabile al nostro consumo attuale, *deve raggiungere le*

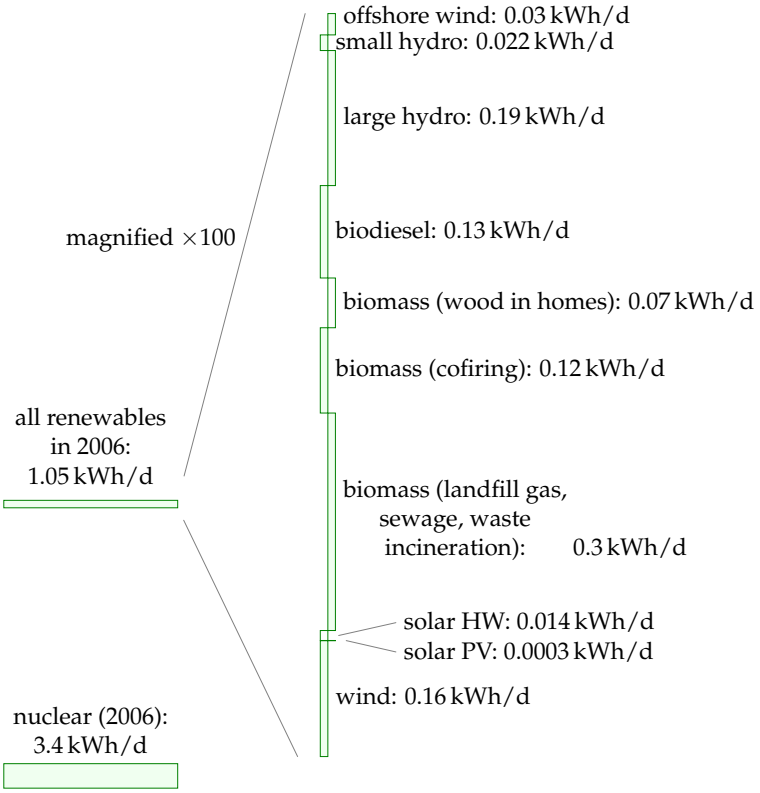


Figura 18.9. Produzione da energie rinnovabili ed energia nucleare nel Regno Unito nel 2006. Tutte le potenze sono espresse per persona, come al solito. La ripartizione delle fonti rinnovabili sul lato destro viene riportata in scala in verticale, modificata di un fattore 100.

dimensioni di un Paese. Per ottenere un grande contributo dal vento, abbiamo usato un parco eolico delle dimensioni del Galles. Per ottenere un grande contributo dal solare fotovoltaico, abbiamo richiesto la metà della superficie del Galles. Per ottenere un grande contributo dalle onde, abbiamo immaginato parchi marini per le onde che coprano la linea costiera per 500 km. Per avere colture energetiche che diano un grande contributo, ci siamo presi il 75% di tutto il Paese.

Gli impianti di rinnovabili devono avere le dimensioni di Paesi, essendo che tutte le fonti rinnovabili presentano una densità di potenza installata particolarmente bassa [letteralmente: sono disseminate, sparpagliate. (N.d.T.)]. La Tabella 18.10 riassume la maggior parte delle potenze per unità di superficie che abbiamo incontrato nella Parte I.

Sostenere lo stile di vita britannico grazie solo alle sue energie rinnovabili sarebbe molto difficile. Una soluzione basata sull'energia rinnovabile sarà necessariamente grande ed invasiva.

2. *Si sta rivelando niente affatto facile* stilare un piano dove i conti tornino e che utilizzi soltanto fonti rinnovabili. Se vogliamo davvero uscire

Potenza per unità di superficie terrestre o di acqua	
Eolico	2 W/m^2
Eolico offshore	3 W/m^2
Bacini per maree	3 W/m^2
Impianto a flusso di marea	6 W/m^2
Pannelli solari FV	5–20 W/m^2
Piante	0.5 W/m^2
Acqua pluviale (Highlands)	0.24 W/m^2
Centrale idroelettrica	11 W/m^2
Geotermico	0.017 W/m^2

Tabella 18.10. Gli impianti di rinnovabili devono avere le dimensioni di Paesi, dato che tutte le fonti rinnovabili sono "particolarmente disseminate".

dai combustibili fossili, gli inglesi stanno per imparare ad iniziare a dire di "sì" a qualcosa. In effetti, a diverse cose.

Nella Parte II chiederò: "assunto che non possiamo ottenere una produzione da fonti rinnovabili che si sommino fino a raggiungere i nostri attuali consumi, quali sono le altre opzioni?".

Note ed approfondimenti

p.

115 *Il consumo medio di energia del Regno Unito è 125 kWh al giorno per persona.* Ho preso questo numero dal UNDP Human Development Report del 2007.
Il DTI (ora conosciuto come DBERR) pubblica un Compendio delle Statistiche sull'Energia del Regno Unito ogni anno. [uzek2]. Nel 2006, secondo DUKES, la domanda totale di energia primaria è stata pari a 244 milioni di tonnellate equivalenti di petrolio, che corrisponde a 130 kWh al giorno per persona.
Non conosco il motivo della piccola differenza tra il numero di UNDP ed il numero di DUKES, ma posso spiegare perché ho scelto il numero leggermente inferiore. Come ho già detto a pagina 32, DUKES usa la mia stessa convenzione per sommare le energie, dichiarando un kWh di energia chimica pari ad un kWh di energia elettrica. Ma c'è una piccola eccezione: DUKES definisce "l'energia primaria" prodotta nelle centrali nucleari come energia termica, che nel 2006 è stata di 9 kWh/gg/p; questo è stato convertito (con rendimento del 38%) in 3.4 kWh/gg/p di elettricità fornita; nei miei conti, mi sono concentrato sull'energia elettrica prodotta da idroelettrico, altre fonti rinnovabili e nucleare; questo piccolo scambio in termini di convenzione riduce il contributo nucleare di circa 5 kWh/gg/p.

116 *Le perdite nella rete di trasmissione dell'energia elettrica tagliano via l'1% del consumo totale nazionale di energia*. Per dirla in altro modo, le perdite costituiscono l'8% dell'energia elettrica prodotta. Questa perdita dell'8% può essere così suddivisa: circa l'1.5% viene perso nel sistema ad alta tensione a lunga distanza, il 6% nel sistema di approvvigionamento pubblico locale. Fonte: MacLeay et al. (2007).

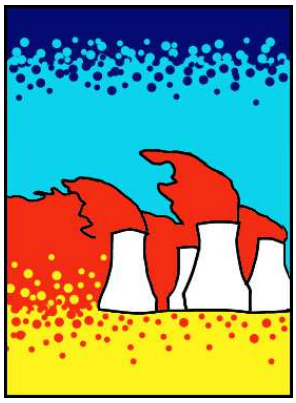
– *Figure 18.4.* Dati attinti dal UNDP Human Development Report, 2007. [3av4s9]

119 *Nel Medioevo, lo stile di vita di una persona media comportava un consumo di potenza pari a 20 kWh al giorno.* Fonte: Malanima (2006).

120 *"Sono più preoccupato per quelle brutte linee elettriche che arrivano a riva di quanto lo fossi riguardo ad un'invasione nazista."* Fonte: [6frj55].

Parte II

Fare la differenza



19 Ogni GRANDE azione è di grande aiuto

Abbiamo stabilito che il Regno Unito non può sostenere il suo attuale stile di vita sulle proprie rinnovabili (se non tramite l'industrializzazione di aree di terra e di mare che abbiano le dimensioni di interi Paesi). Dunque, quali sono le nostre opzioni, se vogliamo abbandonare i combustibili fossili e vivere in modo sostenibile? Possiamo equilibrare il bilancio energetico attraverso la diminuzione della domanda oppure aumentando l'offerta o, naturalmente, facendo entrambe le cose.

Non mi faccio illusioni. Per raggiungere il nostro obiettivo e liberarci dei combustibili fossili, riduzione della domanda ed aumento dell'offerta debbono essere *grandi*. Non facciamoci distrarre dal mito delle "piccole azioni". *Se ognuno fa poco, otterremo poco.* Dobbiamo fare molto. Ciò che è necessario sono *grandi* cambiamenti nella domanda come nell'offerta.

"Ma come, se 60 milioni di persone fanno tutte un po', il tutto non si sommerà fino a fare un sacco?" No. Questa macchina moltiplicatrice nota come "se-tutti" è solo un mezzo per far sì che qualcosa di piccolo *appaia* come grosso. La macchina moltiplicatrice "se-tutti" sforna affermazioni ispiratrici del tipo "se *tutti* facessero X, allora ci sarebbe abbastanza energia / acqua / gas per fare Y", dove Y suona in modo impressionante. Sorpresi che Y appaia grosso? Certo che no. Abbiamo ottenuto Y moltiplicando X per il numero di persone coinvolte – 60 milioni o giù di lì! Ecco un esempio dal *Libro Blu per un'Economia Verde* del Partito Conservatore, qui sì che si parla schietto:

> "Il caricabatterie di un cellulare ha in media grosso modo . . . un consumo pari a 1 W, ma se ognuno dei 25 milioni di caricabatterie dei telefoni cellulari del paese venisse lasciato collegato ed acceso si consumerebbe un quantitativo di elettricità (219 GWh) sufficiente ad alimentare 66 000 abitazioni per un anno."

66 000? Wow, un sacco di case! Staccate quei caricabatterie! 66 000 suona come un sacco, ma la cosa più sensata con cui fare un confronto è il numero totale di case che si immagina parteciperebbe a tale impresa volta al risparmio, vale a dire *25 milioni* di case. 66 000 è solo *un quarto dell'un percento* di 25 milioni. Dunque, mentre la dichiarazione citata sopra è vera, ritengo che, per star tranquilli, sia meglio metterla in questi termini:

> Se lasciate collegato il caricabatterie del vostro cellulare, questo caricabatterie utilizzerà un quarto dell'un percento della corrente elettrica della vostra abitazione.

E se lo fanno tutti?

> Se *tutti* lasciano collegato il caricabatterie del loro cellulare, questi caricabatterie utilizzeranno un quarto dell'un percento della corrente elettrica delle abitazioni di tutti.

"Eravamo intenzionati a farci una turbina eolica; ma, sa com'è, non sono poi così efficienti."

Figura 19.1. Riproduzione per gentile concessione di PRIVATE EYE / Robert Thompson `www.private-eye.co.uk`.

La macchina moltiplicatrice "se-tutti" è una cosa negativa, perché devia l'attenzione della gente da 25 milioni di squali verso 25 milioni di pesciolini. Il mantra *"piccoli cambiamenti possono fare una grande differenza"* è una panzana, se applicato ai cambiamenti climatici ed al concetto di potenza. Può essere vero che "molte persone che fanno poco producono un sacco", ma questo solo se tutte quelle "piccole azioni" sono in un qualche modo concentrate in un unico "sacco" – per esempio, se un milione di persone donano £10 ciascuna ad *una* vittima di un incidente, allora la vittima riceve 10 milioni di sterline. Che è un sacco. Ma la potenza è ben altra cosa. Tutti noi utilizziamo della potenza. Quindi, per ottenere una "grande differenza" nel consumo totale, è necessario che quasi tutti facciano la differenza, una differenza "grande", nei propri consumi.

Pertanto, ciò che viene richiesto sono *grandi* cambiamenti della domanda e dell'offerta. La domanda di potenza può essere ridotta in tre modi:

1. riducendo la nostra popolazione (figura 19.2);
2. cambiando i nostri stili di vita;
3. mantenendo il nostro stile di vita, ma riducendone l'intensità energetica mediante "efficienza" e "tecnologia".

L'offerta può essere aumentata in tre modi:

1. Potremmo abbandonare i combustibili fossili, investendo nella tecnologia del "carbone pulito". Oops! Il carbone è un combustibile fossile. Beh, non importa – diamo uno sguardo a questa idea. Se usassimo il carbone "sostenibile" (un concetto che definiremo tra poco), quanta energia ci potrebbe offrire? Se non ci preoccupiamo per la sostenibilità e vogliamo solo "sicurezza degli approvvigionamenti", il carbone ce la potrebbe offrire?
2. Potremmo investire nella fissione nucleare. L'attuale tecnologia nucleare è "sostenibile"? È almeno un tappabuchi in grado di durare 100 anni?
3. Potremmo comprare, mendicare o rubare energia rinnovabile da altri Paesi – tenendo presente che la maggior parte dei Paesi sarà sulla stessa barca della Gran Bretagna e non avrà energia rinnovabile da perdere ed altresì che l'approvvigionamento di energia rinnovabile da un altro Paese non riduce magicamente gli impianti di energia rinnovabile necessari. Se importiamo energia rinnovabile da altri Paesi al fine di evitare la costruzione di impianti rinnovabili delle dimensioni del Galles nel *nostro*, qualcuno dovrà costruire impianti aventi grosso modo le dimensioni del Galles in questi altri Paesi.

I prossimi sette capitoli discutono prima di come ridurre la domanda in modo sostanziale e secondo di come aumentare l'offerta per rispondere

Mentre ciascun individuo non può ridurre a zero la propria impronta, l'assenza di un individuo fa proprio questo.

Chris Rapley, ex Direttore del British Antarctic Survey

Abbiamo bisogno di meno gente, non di "gente più verde".

Daily Telegraph, 24 July 2007

La democrazia non può sopravvivere alla sovrappopolazione. La dignità umana non può sopravvivere alla sovrappopolazione.

Isaac Asimov

"Dovremo ridurre le tue emissioni."

Figura 19.2. Crescita della popolazione e delle emissioni . . . vignetta gentilmente fornita da Colin Wheeler.

alla domanda ridotta ma ancora "enorme". In questi capitoli, non voglio parlare di *tutte* le buone idee. Parlerò solo delle *grandi* idee.

Gran Bretagna "in versione fumetto"

Per semplificare e razionalizzare la nostra discussione concernente la riduzione della domanda, propongo di lavorare con un modello schematico e stilizzato del consumo energetico britannico [in pratica quasi una rappresentazione fumettistica della realtà. (N.d.T.)], omettendo un sacco di dettagli, al fine di concentrarci sul quadro generale. La mia Gran Bretagna "versione fumetto" consuma energia in appena tre forme: riscaldamento, trasporti ed elettricità. Il consumo in termini di riscaldamento di tale modello schematico è pari a 40 kWh al giorno per persona (attualmente tutti forniti da combustibili fossili), il consumo in termini di trasporto è anch'esso pari a 40 kWh al giorno per persona (attualmente tutti forniti da combustibili fossili); mentre il consumo di energia elettrica è di 18 kWh(e) al giorno per persona. L'elettricità è attualmente quasi tutta generata da combustibili fossili, la conversione di energia da combustibili fossili in energia elettrica ha un'efficienza del 40%, di modo che fornire 18 kWh(e) di energia elettrica nella versione stilizzata della Gran Bretagna di oggi richiede un'alimentazione a combustibili fossili che ammonta a 45 kWh al giorno per persona. Questa semplificazione ignora alcuni dettagli piuttosto consistenti, come l'agricoltura e l'industria, nonché l'energia incorporata nelle merci importate! Ma mi piacerebbe essere in grado di sostenere una *rapida* conversazione sulle cose principali da farsi per abbandonare i combustibili fossili. Riscaldamento, trasporti ed energia elettrica rappresentano più della metà del nostro consumo energetico; quindi se saremo in grado di elaborare un piano che offra riscaldamento, trasporti ed energia elettrica sostenibili, avremo fatto un buon passo sulla strada per un piano più dettagliato dove i conti tornino definitivamente.

Dopo aver adottato questo modello stilizzato della Gran Bretagna, le nostre discussioni inerenti la riduzione della domanda gireranno solo intorno a tre punti. In primo luogo, come si può ridurre la domanda di energia del trasporto ed eliminare integralmente l'uso di combustibili fossili? Questo è l'argomento del Capitolo 20. In secondo luogo, come si può ridurre la domanda di energia per il riscaldamento ed eliminare tutti i combustibili fossili utilizzati per il riscaldamento? Questo è l'argomento del Capitolo 21. In terzo luogo, che dire dell'elettricità? Il Capitolo 22 discute l'efficienza nel consumo di energia elettrica.

Tre opzioni di approvvigionamento – carbone pulito, nucleare, fonti rinnovabili altrui vengono, poi, discusse nei Capitoli 23, 24 e 25. Infine, il Capitolo 26 discute di come far fronte alle fluttuazioni della domanda ed alle fluttuazioni nella produzione di energia rinnovabile.

Dopo aver delineato le opzioni di riduzione della domanda e di aumento dell'offerta, i Capitoli 27 e 28 discutono vari modi di mettere insieme

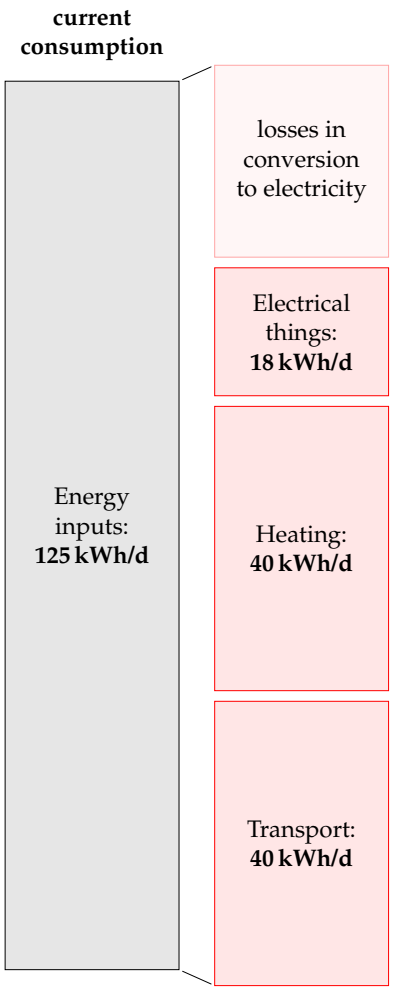


Figura 19.3. Consumi attuali nella "Gran Bretagna versione fumetto del 2008".

queste opzioni per fare piani nei quali i conti tornino, affinché siano forniti al nostro modello schematico di Gran Bretagna trasporti, riscaldamento ed elettricità.

Potrei spendere pagine su pagine discutendo su "le 50 cose che potete fare per fare la differenza", ma ritengo che questo approccio "fumettistico", inseguendo i tre pesci più grandi, dovrebbe condurci a politiche più efficaci.

Ma che dire della "roba"? In accordo a quanto riportato nella Parte I, l'energia incorporata nella roba d'importazione potrebbe essere il pesce più grosso di tutti! Sì, forse, quel pesce è il mammut nella stanza. Ma lasciamo de-fossilizzare il mammut in disparte e concentriamoci su quegli animali sui quali abbiamo un controllo diretto.

Eccoci dunque: parliamo di trasporto, riscaldamento ed elettricità.

Per il lettore impaziente

Siete ansiosi di conoscere la fine della storia subito? Ecco un riassunto veloce, un anteprima della Parte II.

In primo luogo, si elettrifica il trasporto. L'elettrificazione da una parte tiene i trasporti lontani dai combustibili fossili, dall'altra li rende più efficienti. (Naturalmente, l'elettrificazione incrementa la domanda di elettricità verde).

In secondo luogo, per integrare il riscaldamento solare-termico, si elettrifica la gran parte del riscaldamento di aria ed acqua negli edifici tramite *pompe di calore*, che sono quattro volte più efficienti dei riscaldatori elettrici ordinari. L'elettrificazione del riscaldamento aumenta ulteriormente la quantità di elettricità verde richiesta.

In terzo luogo, si ottiene tutta l'elettricità verde da un mix di quattro fonti: dalle nostre fonti di energia rinnovabile; dal "carbone pulito", forse; magari dal nucleare ed infine, con grande cortesia, dalle fonti rinnovabili di altri Paesi.

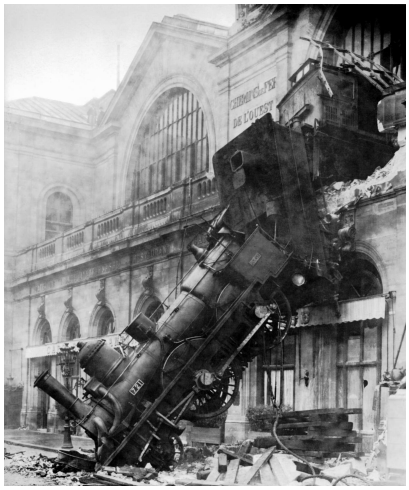
Tra le energie rinnovabili di altri Paesi, l'energia solare nei deserti è l'opzione più abbondante. Fintantoché saremo in grado di sviluppare collaborazioni internazionali pacifiche, l'energia solare nei deserti altrui avrà sicuramente il potenziale tecnico per rifornire noi, loro e tutti quanti di 125 kWh al giorno a persona.

Domande? Continuate a leggere.

20 Trasporti più efficienti

La tecnologia dei veicoli moderni è in grado di ridurre le emissioni incidenti sui cambiamenti climatici senza modificare l'aspetto e/o le prestazioni che i possessori oggigiorno si aspettano.

California Air Resources Board



Circa un terzo della nostra energia va in trasporti. La *tecnologia* è in grado di assicurare una riduzione dei consumi? In questo capitolo si esplorano le opzioni per il raggiungimento di due obiettivi: fornire la maggiore riduzione possibile del consumo di energia nei trasporti *ed* eliminare l'uso di combustibili fossili in tale settore.

I trasporti vengono descritti in tre dei nostri capitoli inerenti il consumo: Capitolo 3 (automobili), Capitolo 5 (aeroplani) e Capitolo 15 (trasporto merci su strada e via mare). Pertanto, esistono due tipi di trasporto da affrontare: trasporto passeggeri e trasporto merci. La nostra unità di trasporto passeggeri è passeggero-chilometro (p-km). Se una macchina trasporta una persona per una distanza di 100 km, fornisce 100 p-km di trasporto. Se ne trasporta quattro alla stessa distanza, fornisce 400 p-km. Allo stesso modo la nostra unità di trasporto merci è la tonnellata-chilometro (t-km). Se un camion trasporta 5 t di carico ad una distanza di 100 km, allora fornisce 500 t-km di trasporto merci. Misureremo il consumo di energia del trasporto passeggeri in "kWh per 100 passeggero-chilometri" e il consumo di energia del trasporto merci in "kWh per tonnellata-chilometri". Si noti che queste misure sono la controparte dei "chilometri per litro": mentre ci piacciono i veicoli che forniscono *molti* chilometri per litro, vogliamo altresì che il consumo energetico ammonti a *pochi* kWh per 100 p-km.

Inizieremo questo capitolo discutendo di come ridurre il consumo di energia nel trasporto di superficie. Per capire come ridurre il consumo di energia, abbiamo bisogno di capire dove va l'energia nei trasporti di superficie. Qui di seguito i tre concetti chiave, che sono spiegati in dettaglio nel Capitolo Tecnico Capitolo A.

1. Nei *brevi tragitti* con un sacco di partenze e fermate, l'energia se ne va soprattutto nell'accelerazione del veicolo e di quanto in esso contenuto. Strategie chiave per consumare meno in questo genere di trasporto sono, pertanto, il *pesare meno* e lo *spingersi il più lontano possibile tra una fermata e l'altra*. La frenata rigenerativa, che cattura l'energia in fase di rallentamento, può altresì essere di aiuto. Aiuta, inoltre, il *muoversi più lentamente* e lo *spostarsi di meno*.

2. Nei *lunghi tragitti* a velocità costante, in treno o in automobile, la maggior parte dell'energia va nel far turbinare l'aria tutt'intorno, dato che si deve accelerare il veicolo una sola volta. Le strategie fondamentali per consumare meno in questo tipo di trasporto sono,

Figura 20.1. Punto di partenza di questo capitolo: un trattore urbano di lusso. La vettura media del Regno Unito ha un consumo di carburante pari a circa 12 kmpl [chilometri per litro. (N.d.T.)], il che corrisponde ad un consumo di 80 kWh per 100 km. Si può fare di meglio?

pertanto, il *muoversi più lentamente* e lo *spostarsi di meno*, nonché *usare veicoli lunghi e sottili*.

3. In tutte le forme di viaggio, c'è una catena di conversione energetica, dove si prende l'energia da una qualche sorta di carburante e se ne utilizza una parte per spingere il veicolo. Inevitabilmente questa catena energetica presenta delle inefficienze. In una vettura standard a combustibili fossili, per esempio, solo il 25% è utilizzato per la spinta, mentre circa il 75% dell'energia viene persa nel rendere caldi motore e radiatore. Dunque, una strategia definitiva ai fini di un minor consumo energetico consiste nel rendere la catena di conversione energetica più efficiente.

Queste osservazioni ci conducono a sei principi di progettazione ed utilizzo dei veicoli per un trasporto di superficie più efficiente: *a*) ridurre l'area frontale a persona; *b*) ridurre il peso del veicolo a persona; *c*) quando si viaggia, procedere a velocità costante evitando l'utilizzo dei freni; *d*) viaggiare più lentamente; *e*) viaggiare di meno e *f*) rendere la catena energetica più efficiente. Discuteremo ora di una varietà di modi per l'applicazione di tali principi.

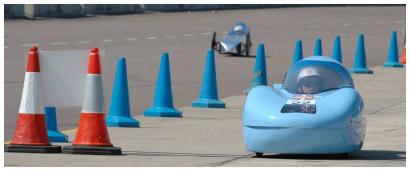


Figura 20.2. L'auto ecologica del Team Crocodile utilizza 1.3 kWh per 100 km. Foto gentilmente fornita dal Team Crocodile. `www.teamcrocodile.com`

Come viaggiare meglio

Una statistica ampiamente citata dice qualcosa sulla falsariga di "solo l'*1 percento* dell'energia utilizzata da un'auto viene impiegata nel muovere il guidatore" – ciò implica che, di sicuro, se solo fossimo un po' più intelligenti, potremmo costruire auto *100* volte più efficienti? La risposta è sì, o quasi, ma solo applicando i principi di progettazione ed uso dei veicoli, di cui sopra, al *massimo* grado.

Un esempio di progetto di veicolo estremo è un'auto ecologica, che abbia una piccola area frontale e poco peso e – se proprio si vuole battere tutti i record – che sia attentamente condotto ad una velocità bassa e costante. L'auto ecologica del *Team Crocodile* (figura 20.2) fa 2184 miglia con un gallone [circa 773 km per litro. (N.d.T.)] (1.3 kWh per 100 km) ad una velocità di 15 mph (24 km/h). Con un peso di 50 kg ed un'altezza inferiore a quella di un cono segnaletico, essa può comodamente ospitare un guidatore adolescente.

Figura 20.3. "Bambini a bordo". Questa modalità di trasporto ha un costo energetico di 1 kWh per 100 persona-km.

Hmm. Penso che il conducente del trattore urbano in figura 20.1 potrebbe rilevare un cambiamento di "stile, sensazioni e prestazioni" nel passaggio all'auto ecologica, soprattutto se lo si istruisse a mantenere la propria velocità al di sotto dei 24 chilometri orari. Pertanto, l'idea che le auto potrebbero facilmente essere 100 volte più efficienti in termini di energia è un mito. Torneremo alla sfida di fabbricare auto ad alta efficienza energetica tra un momento. Prima, vediamo alcuni altri modi di soddisfare i principi per un trasporto di superficie più efficiente.

La Figura 20.3 mostra un veicolo multi-passeggero che è almeno 25 volte più efficiente di una vettura di serie a benzina: una bicicletta. Le prestazioni della bicicletta (in termini di energia per distanza percorsa) sono circa la stesse dell'eco-vettura di cui sopra. La velocità è la stessa, la massa è inferiore (giacché l'essere umano sostituisce serbatoio e motore), mentre l'area frontale effettiva è superiore, perché il ciclista non è altrettanto aerodinamico.

La Figura 20.4 mostra un altro possibile sostituto per l'auto a benzina: un treno, con un costo energetico, se pieno, di 1.6 kWh per 100 p-km. Al contrario dell'auto ecologica e della bicicletta, i treni riescono a raggiungere un'efficienza eccezionale senza viaggiare lentamente e senza avere un basso rapporto peso-persona. I treni compensano la loro alta velocità ed il telaio pesante sfruttando il principio della piccola area frontale a persona. Laddove un ciclista ed un'auto regolare hanno un'area frontale effettiva di circa 0.8 m^2 e 0.5 m^2 rispettivamente, un treno pieno di pendolari da Cambridge a Londra ha una superficie frontale per passeggero pari a 0.02 m^2.

Ma oops, qui si affronta un brutto argomento – la prospettiva di condividere un veicolo con "tutte quelle orribili persone". Beh, saliamo a bordo e, schiacciati come sardine, chiediamoci: quanto potrebbero essere ridotti i consumi passando da mezzi privati che trangugiano carburante ad eccellenti mezzi di trasporto pubblico integrato?

Figura 20.4. Questo treno a 8 carrozze, alla velocità massima di 100 mph (161 km/h), consuma 1.6 kWh per 100 p-km, se a pieno carico.

4.4 kWh per 100 p-km, se al completo

3–9 kWh per 100 posti-km, se al completo

Figura 20.5. Alcuni mezzi pubblici e la loro efficienza energetica, nelle migliori condizioni possibili [i.e. al completo. (N.d.T.)].
Treno della metropolitana, visto da fuori e da dentro.
Due treni ad alta velocità. Quello elettrico utilizza 3 kWh per 100 posti (a sedere)-km; il diesel, 9 kWh.
Filobus a San Francisco.
Autobus marino a Vancouver . Foto di Larry.

7 kWh per 100 p-km, se al completo

21 kWh per 100 p-km, se al completo

Trasporto pubblico

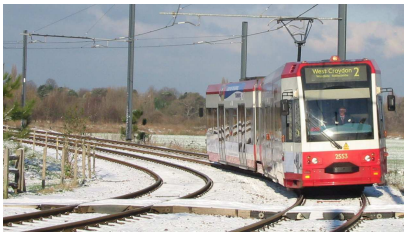
Al suo meglio, il trasporto pubblico condiviso è di gran lunga più efficiente di quello individuale su auto. Un **pullman**, con motore diesel, trasportando 49 passeggeri e facendo circa 4 chilometri per litro a 105 chilometri all'ora, impiega 6 kWh per 100 p-km – 13 volte meglio rispetto alla macchina con una sola persona a bordo. La **rete filobus** di Vancouver consuma 270 kWh per 100 veicolo-km ad una velocità media di 15 km/h. Se il filobus dispone di 40 passeggeri a bordo, allora il costo del trasporto passeggeri è di 7 kWh per 100 p-km. Il **bus marino** di Vancouver ha un costo di trasporto di 83 kWh per veicolo-km ad una velocità di 13.5 km/h. Esso è in grado di ospitare 400 persone, quindi, quando è al completo, il suo costo di trasporto passeggeri è pari a 21 kWh per 100 p-km. A Londra i **treni della metropolitana**, nelle ore di punta, utilizzano 4.4 kWh per 100 p-km – 18 volte meglio delle vetture con una sola persona a bordo. Anche i **treni ad alta velocità**, che violano due dei nostri principi di risparmio energetico, andando due volte più veloci di un'autovettura e pesando molto, sono molto più efficienti in termini di energia: se il treno elettrico ad alta velocità è al completo, il suo costo energetico è di 3 kWh per 100 p-km – il che significa 27 volte meno di quello di un'auto!

Figura 20.6. Alcuni treni non sono pieni. Tre uomini e un violoncello – gli unici occupanti di questa carrozza del treno ad alta velocità delle 10.30 da Edimburgo a Kings Cross.

Tuttavia, dobbiamo essere realistici nella nostra pianificazione. Alcuni treni, pullman, autobus non sono pieni (figura 20.6). Pertanto, il costo *medio* dell'energia inerente il trasporto pubblico è superiore alle cifre viste nei casi appena citati. Qual è il consumo energetico *medio* dei sistemi di trasporto pubblico e qual è una valutazione realistica di quanto buoni potrebbero essere?

Nel 2006–7, il costo energetico totale di tutti i treni della metropolitana di Londra, ivi compresi illuminazione, ascensori, depositi e laboratori, è stato di 15 kWh per 100 p-km – cinque volte meglio di quanto presenti la nostra autovettura di base. Nel 2006–7 il costo energetico di tutti gli autobus di Londra è stato di 32 kWh per 100 p-km. Il costo energetico non è l'unica cosa che conta, naturalmente. I passeggeri si preoccupano della velocità: i treni della metropolitana forniscono velocità più elevate (una media di 33 km/h) degli autobus (18 km/h). I gestori si preoccupano dei costi finanziari: le spese per il personale dei treni della metropolitana sono inferiori a quelle degli autobus, in termini di p-km.

32 kWh per 100 p-km



9 kWh per 100 p-km

Figura 20.7. Alcuni mezzi pubblici, ed i loro consumi *medi* di energia. A sinistra: autobus rossi. A destra: Croydon Tramlink. Foto di Stephen Parascandolo.

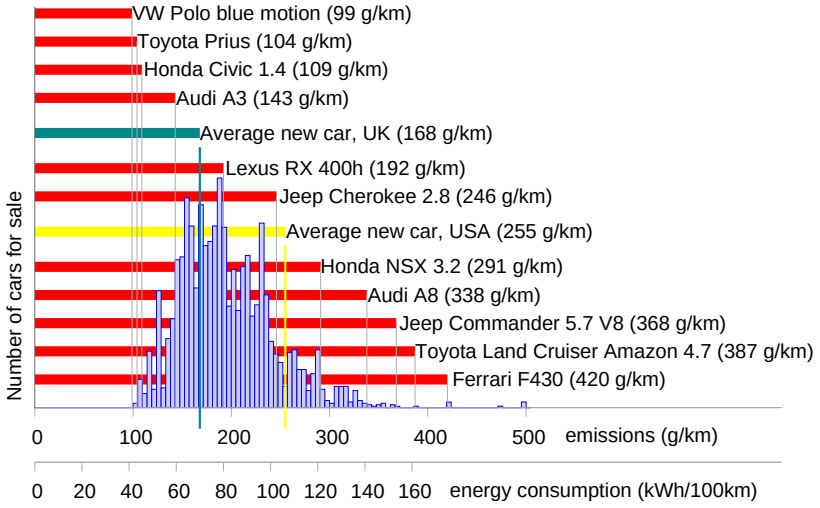


Figura 20.9. Inquinamento da carbonio, in grammi di CO_2 per km, di una selezione di auto in vendita nel Regno Unito. L'asse orizzontale indica il tasso di emissione, mentre l'altezza dell'istogramma blu indica il numero di modelli in commercio con tali emissioni nel 2006. Fonte: `www.newcarnet.co.uk`.
La seconda scala orizzontale indica i consumi energetici approssimativi, assumendo che 240 g CO_2 siano associati a 1 kWh di energia chimica.

Il consumo totale di energia del sistema Tramlink Croydon (figura 20.7) nel 2006–7 (compreso il deposito e le strutture alle fermate dei tram) è stato di 9 kWh per 100 p-km, con una velocità media di 25 km/h.

Quanto buono potrebbe essere il trasporto pubblico? Forse possiamo ottenere un'indicazione approssimativa guardando i dati provenienti dal Giappone nella tabella 20.8. A 19 kWh per 100 p-km e 6 kWh per 100 p-km, autobus e trasporto su rotaia sembrano entrambi promettenti. Il ferroviario ha il bel vantaggio di poter risolvere entrambi i nostri obiettivi – riduzione del consumo energetico ed indipendenza dai combustibili fossili. Autobus e pullman hanno evidenti vantaggi di semplicità e flessibilità; tuttavia, mantenere tale flessibilità ed al tempo stesso ottenere che autobus e pullman lavorino senza combustibili fossili può essere una sfida.

Per riassumere, i mezzi pubblici (treni, soprattutto se elettrici, tram e autobus) sembrano un modo promettente per fornire il trasporto di passeggeri – migliore in termini di energia per passeggero-km, forse cinque o dieci volte meglio delle automobili. Tuttavia, se le persone richiedono la flessibilità di un veicolo privato, quali sono le altre opzioni?

	Consumo energetico (kWh per 100 p-km)
Automobile	68
Autobus	19
Rotaia	6
Aria	51
Mare	57

Tabella 20.8. Efficienza complessiva del trasporto nelle varie modalità in Giappone (1999).

Veicoli privati: tecnologia, legislazione ed incentivi

Il consumo energetico delle automobili per uso individuale *può* essere ridotto. L'ampia gamma di efficienze energetiche delle auto in vendita lo dimostra. In un unico show-room nel 2006 si potevano acquistare una Honda Civic 1.4 che utilizza circa 44 kWh per 100 km oppure una Honda NSX 3.2 che utilizza 116 kWh per 100 km (figura 20.9). Il fatto che la gente allegramente *compra* in questa gamma è anche la prova che abbiamo bisogno di incentivi extra e che la legislazione incoraggi il consumatore spensierato a *scegliere* automobili a maggiore efficienza energetica. Ci so-

Figura 20.10. Speciali privilegi di parcheggio per auto elettriche ad Ann Arbor, Michigan.

no vari modi per aiutare i consumatori che preferiscono la Honda Civic alla Honda NSX 3.2, gran bevitrice di benzina: aumentare il prezzo dei carburanti ed alzare la tassa di esposizione (la tassa sulle auto nuove) in proporzione ai consumi previsti per l'intera durata del veicolo; aumentare le imposte relative alla messa su strada per i tracanna-benzina; offrire privilegi di parcheggio per automobili economiche (figura 20.10); razionare il carburante. Tutte queste misure sono impopolari, almeno per alcuni elettori. Forse una tattica migliore dal punto di vista legislativo potrebbe essere quella di *far rispettare* una ragionevole efficienza energetica, piuttosto che continuare a consentire la scelta non vincolata. Ad esempio, si potrebbe semplicemente *vietare*, da una certa data, la vendita di *qualsiasi* vettura il cui consumo di energia superi gli 80 kWh per 100 km; per poi ridurre col tempo tale limite a 60 kWh per 100 km, quindi a 40 kWh per 100 km e così via. In alternativa, per dare più scelta ai consumatori, le norme potrebbero obbligare le case automobilistiche a ridurre il consumo *medio* di energia di tutte le auto che vendono. Una legislazione supplementare, limitando il peso e la superficie frontale dei veicoli, potrebbe al contempo ridurre i consumi e migliorare la sicurezza degli altri utenti della strada (figura 20.11). La gente sceglie oggi le proprie auto per ostentare una moda. Con una forte legislazione sull'efficienza, rimarrebbe ancora vasta scelta in termini di moda, semplicemente ogni scelta sarebbe ad alta efficienza energetica. Si potrebbe scegliere qualsiasi colore, purché verde.

Figura 20.11. Le mostro-mobili sono abbastanza alte da oscurare completamente la vista e la visibilità dei pedoni.

Mentre aspettiamo che gli elettori e i politici si mettano d'accordo per legiferare a favore delle auto efficienti, quali altre opzioni sono disponibili?

Figura 20.12. Una rotatoria a Enschede, Paesi Bassi.

Bici

Il mio suggerimento preferito è quello di fornire eccellenti servizi ed infrastrutture per i velocipedi, con una legislazione appropriata (bassi limiti di velocità e normative inerenti le collisioni che favoriscono i ciclisti, per esempio). La Figura 20.12 mostra una rotatoria a Enschede, Paesi Bassi. Le rotonde sono due, concentriche: quella per le auto si trova all'interno di quella per le biciclette, con una lunghezza pari ad un'auto che separa

comodamente le due. Le regole per la precedenza sono le stesse di quelle di una rotatoria inglese, salvo che le auto in uscita dal cerchio centrale devono dare la precedenza ai ciclisti circolanti (proprio come le auto inglesi danno la precedenza ai pedoni sulle strisce pedonali). Se vi sono ottime strutture ciclabili, la gente le usa, come dimostra il numero infinito di cicli soggiornanti fuori dalla stazione ferroviaria di Enschede (figura 20.13).

In qualche modo, la fornitura ciclabile britannica (figura 20.14) non è all'altezza dello standard olandese.

Figura 20.13. Qualche bici olandese.

Figura 20.14. Nel frattempo, di ritorno in Gran Bretagna...
Foto a destra di Mike Armstrong.

Nella città francese di Lione è stata introdotta nel 2005 una rete a gestione privata della bicicletta pubblica, Vélo'v, che si è dimostrata popolare. Con una popolazione di 470 000 abitanti, Lione è servita da 2000 bici distribuite in circa 175 ciclo-stazioni su di una superficie di 50 km^2 (figura 20.15). In centro città, si è di norma a 400 metri da una ciclo-stazione. Gli utenti aderiscono al progetto pagando un quota d'iscrizione annuale pari a €10 e possono poi noleggiare gratuitamente biciclette per tutti i viaggi aventi una durata inferiore ai 30 minuti. Per periodi più lunghi di noleggio, gli utenti pagano al massimo €1 all'ora. I visitatori che soggiornano per un breve periodo a Lione possono acquistare abbonamenti di una settimana per €1.

Figura 20.15. Una stazione Vélo'v a Lione.

Altre opportunità legislative

I limiti di velocità sono una semplice manopola che è possibile rigirare. Come regola generale, le auto che viaggiano più lentamente usano meno energia (cfr. Capitolo A). Con la pratica, gli automobilisti possono imparare a guidare in modo più economico: usando meno il pedale dell'acceleratore e del freno e guidando tenendo sempre innestata la marcia più alta si può ottenere una riduzione del 20% del consumo di carburante.

Un altro modo per ridurre il consumo di carburante è quello di ridurre la congestione. Arresto ed avvio, accelerazione e rallentamento, costituiscono un modo molto meno efficiente per muoversi rispetto al guida-

re senza intoppi. Stazionare nel traffico a regime minimo è una forma particolarmente misera di erogazione di miglia per gallone!

La congestione si verifica quando ci sono troppi veicoli sulle strade. Quindi, una maniera semplice per ridurre la congestione del traffico è quello di raggruppare i viaggiatori in un minor numero di veicoli. Un modo suggestivo per pensare al passaggio dalle auto ai pullman è quello di calcolare la superficie di strada richiesta dalle due modalità. Si prenda una strada statale nel punto di congestione, dove la velocità agognata è di 60 mph [circa 97 km/h. (N.d.T.)]. La distanza di sicurezza da una macchina all'altra a 60 mph è pari a 77 m. Se assumiamo che ci sia una macchina ogni 80 m e che ogni auto contenga 1.6 persone, allora aspirare 40 persone e disporle in un unico pullman significa liberare *due chilometri* di strada!

La congestione può essere ridotta, fornendo buone alternative (piste ciclabili, mezzi pubblici) e facendo pagare una maggiorazione agli utenti della strada laddove contribuiscono alla congestione. Nelle note di questo capitolo ho descritto un metodo equo e semplice per gestire i carichi di congestione.

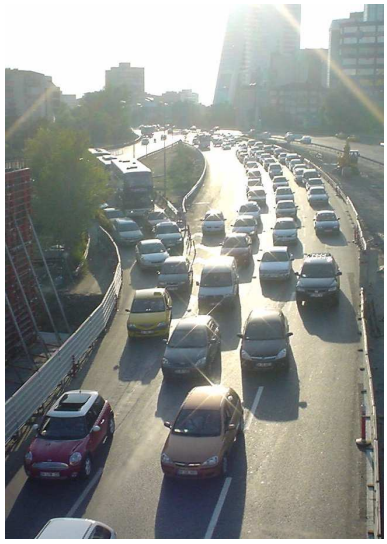


Figura 20.16. Con congestioni come questa, si fa prima ad andare a piedi.

Migliorare le automobili

Supponendo che la storia d'amore tra il mondo sviluppato e l'automobile non sia in procinto di essere interrotta, quali sono le tecnologie che possono fornire un notevole risparmio energetico? Risparmi del 10% o 20% sono facili – abbiamo già discusso di alcuni modi per ottenerli, come la realizzazione di vetture più piccole e leggere. Un'altra opzione è quella di passare dalla benzina al gasolio. I motori diesel sono più costosi da fabbricare, ma tendono ad essere più efficienti. Esistono, però, tecnologie che possono aumentare radicalmente l'efficienza della catena di conversione energetica? (Si ricordi che in una macchina standard a benzina il 75% dell'energia viene convertita in calore e fuoriesce dal radiatore!). E per quanto riguarda l'obiettivo di fare a meno di combustibili fossili?

In questa sezione discuteremo di cinque tecnologie: frenata rigenerativa, auto ibride, auto elettriche, auto a idrogeno ed auto ad aria compressa.

Frenata rigenerativa

Esistono quattro modi per mezzo dei quali catturare l'energia quando un veicolo rallenta.

1. Un generatore elettrico, accoppiato alle ruote, può caricare una batteria elettrica o un supercondensatore.

2. Dei motori idraulici, azionati dalle ruote, possono comprimere aria, immagazzinandola in una piccola scatola metallica.

3. L'energia può essere immagazzinata in un volano.

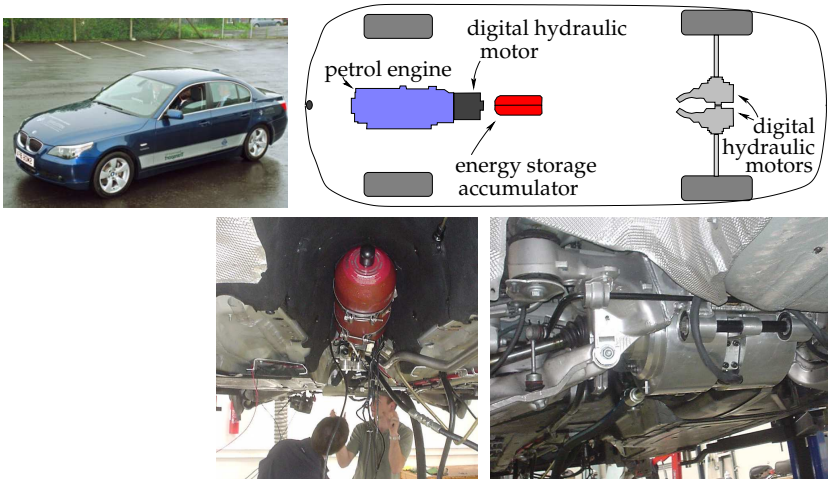


Figura 20.17. Una BMW 530i modificata dalla Artemis Intelligent Power per utilizzare un sistema idraulico digitale. In basso a sinistra: un accumulatore da 6 litri (la bomboletta rossa), in grado di immagazzinare circa 0.05 kWh di energia nell'azoto compresso. In basso a destra: Due motori idraulici da 200 kW, uno per ogni ruota posteriore, entrambi accelerano e decelerano la vettura. La vettura è ancora alimentata dal suo motore a benzina da 190 kW standard, ma grazie alla trasmissione idraulica digitale ed alla frenata rigenerativa, essa utilizza il 30% in meno di carburante.

4. L'energia associata alla frenata può essere immagazzinata come energia gravitazionale guidando il veicolo su di una rampa ogni volta che si vuole rallentare. Questa opzione di accumulo legata all'energia gravitazionale è piuttosto rigida, dal momento che occorre una rampa al posto giusto. È un'opzione che si rivela più utile per i treni, come mostra la linea Victoria della metropolitana di Londra, le cui stazioni sono posizionate su dei dossi. Ogni stazione nella traccia dei binari si trova in cima ad una collina. I treni in arrivo sono rallentati automaticamente dalla collina, mentre quelli in partenza sono accelerati allorché scendono lungo il lato opposto. Progettare con l'opzione stazione-sul-dosso offre un risparmio di energia pari al 5% e rende i treni il 9% più veloci.

Figura 20.18. Un sistema di frenatura rigenerativa a volano. Foto per gentile concessione della Flybrid Systems.

La frenata rigenerativa elettrica (usando una batteria per immagazzinare l'energia) recupera circa il 50% dell'energia della vettura in un evento di frenata, il che porta forse ad una riduzione del 20% del costo energetico di guida in città. I sistemi rigenerativi che utilizzano volani ed idraulica sembrano funzionare un po' meglio rispetto ai sistemi basati su batterie, salvando almeno il 70% dell'energia di frenata. La Figura 20.17 descrive una vettura ibrida con un motore alimentato a benzina con impianto idraulico a controllo digitale. Su cicli di guida standard, questa vettura utilizza il 30% in meno di carburante rispetto alla vettura originale a benzina. Nella guida in città, il suo consumo di energia è dimezzato, da 131 kWh per 100 km a 62 kWh per 100 km (da 7 kmpl a 15 kmpl, grosso modo). (Il credito per un tale miglioramento delle prestazioni deve essere condiviso tra la frenata rigenerativa e l'uso della tecnologia ibrida). Idraulica e volani sono entrambi modi promettenti per gestire la frenata, in quanto piccoli sistemi in grado di gestire grandi potenze rigenerative. Un sistema a volano che pesa solo 24 kg (figura 20.18),progettato per lo stoccaggio di energia

in una macchina da corsa, può immagazzinare 400 kJ (0.1 kWh) di energia – energia sufficiente per accelerare una vettura normale fino a 60 miglia all'ora (97 km/h) – e può ricevere o fornire 60 kW di potenza. Una batteria elettrica in grado di erogare così tanta potenza peserebbe circa 200 kg. Pertanto, a meno che non si stia già trasportando una siffatta batteria a bordo, è probabile che un sistema elettrico per la frenata rigenerativa debba utilizzare dei condensatori per immagazzinare l'energia di frenata. I super-condensatori hanno parametri simili ai volani in termini di potenza erogata e di energia stoccata.

Auto ibride

Le auto ibride come la Toyota Prius (figura 20.19) hanno motori più efficienti e frenata elettrica rigenerativa; ma ad essere onesti, i veicoli ibridi di oggi in realtà non si distinguono dalla folla (figura 20.9).

Figura 20.19. Toyota Prius – secondo Jeremy Clarkson: "un modo di spostarsi molto costoso, molto complesso – neppure strepitosamente verde – lento, dozzinale e senza senso".

Le barre orizzontali in figura 20.9 evidenziano alcune vetture, tra cui due ibride. Considerato che la nuova vettura media nel Regno Unito emette 168 g, la Prius ibrida emette circa 100 g di CO_2 per km, come fanno molti altri veicoli non ibridi – la VW Polo Blue Motion emette 99 g/km e c'è una Smart che emette 88 g/km.

la Lexus RX 400h è la seconda ibrida, pubblicizzata con lo slogan "POCO INQUINAMENTO. ZERO COLPA". Ma le sue emissioni di CO_2 ammontano a 192 g/km – peggio della vettura media del Regno Unito! L'autorità garante per lo standard pubblicitario ha stabilito che questo annuncio ha violato i codici pubblicitari inerenti Veracità, Confronto ed Asserzioni sull'Ambiente. "Abbiamo preso in considerazione il fatto che ... i lettori potrebbero capire che l'auto ha causato poco o nessun danno per l'ambiente, che non è vero nello specifico, e che ha emissioni ridotte in confronto a tutte le auto, che non è altrettanto vero".

In pratica, le tecnologie ibride sembrano offrire un risparmio di carburante del 20 o 30%.

Quindi, né questi ibridi benzina/elettrico, né l'ibrido benzina/idraulico descritto in figura 20.17 mi sembrano aver davvero incrinato la sfida dei trasporti. Una riduzione del 30% nel consumo dei combustibili fossili è impressionante, ma non è abbastanza per gli standard di questo libro. La nostra ipotesi di apertura è che vogliamo uscire dai combustibili fossili o, almeno, ridurne l'uso del 90%. Questo obiettivo può essere raggiunto senza ricorrere alle biciclette?

Veicoli elettrici

L'auto elettrica REVA è stata lanciata nel giugno 2001 a Bangalore e viene esportata nel Regno Unito come G-Wiz.Il motore elettrico della G-Wiz ha una potenza di picco di 13 kW ed è in grado di produrre una potenza costante di 4.8 kW. Il motore è a frenata rigenerativa ed è alimentato da otto

Figura 20.20. veicoli elettrici. Da sinistra a destra: la G-Wiz; il cadavere in decomposizione di un Sinclair C5; una Citroën Berlingo ed una Elettrica.

batterie al piombo da 6 volt, che quando sono completamente cariche offrono un'autonomia "fino a 77 km". Una ricarica completa impiega 9.7 kWh di energia elettrica. Questi numeri implicano un costo dei trasporti pari a 13 kWh per 100 km. I produttori citano sempre le migliori prestazioni dei loro prodotti. Che cosa succede nella vita reale? Le prestazioni reali di una G-Wiz che "vive" a Londra sono mostrate in figura 20.21. Nel corso di 19 ricariche, il costo medio del trasporto presentato da tale G-Wiz è stato di 21 kWh per 100 km – circa quattro volte meglio di una vettura media a combustibili fossili. Il miglior risultato è stato 16 kWh per 100 km ed il peggiore 33 kWh per 100 km. Se siete interessati alle emissioni di carbonio, 21 kWh per 100 km sono l'equivalente di 105 g CO_2 per km, ipotizzando che l'energia elettrica ha un'impronta di 500 g CO_2 per kWh.

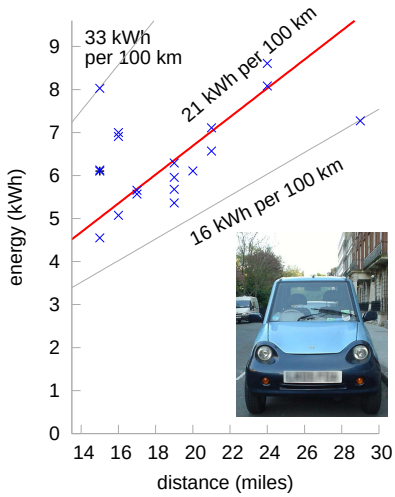


Figura 20.21. Energia elettrica necessaria per ricaricare una G-Wiz in funzione della distanza percorsa. Le misurazioni sono state effettuate alla presa di corrente.

Ora, la G-Wiz si trova ad una delle estremità dello spettro delle prestazioni. E se cercassimo di più – più accelerazione, più velocità, più autonomia? All'altra estremità dello spettro c'è la Tesla Roadster. La Tesla Roadster 2008 ha un'autonomia di 220 miglia (354 km); la sua batteria agli ioni di litio immagazzina 53 kWh ed ha un peso di 450 kg (120 Wh/kg). Il veicolo pesa 1220 kg e la potenza massima del suo motore è di 185 kW. Qual è il consumo di energia di questa muscle car? Sorprendentemente è meglio della G-Wiz: 15 kWh per 100 km. La prova che un'autonomia di 354 km dovrebbe essere sufficiente per la maggior parte delle persone la maggior parte del tempo deriva dal fatto che solo l'8.3% dei pendolari percorrono più di 30 km per recarsi al loro posto di lavoro. Ho cercato i dati inerenti la performance di un sacco di veicoli elettrici – sono elencati nelle note finali di questo capitolo – e sembrano essere coerenti con questa sintesi: i veicoli elettrici sono in grado di fornire un trasporto con un costo energetico di circa 15 kWh per 100 km. Cinque volte meglio della nostra auto a combustibili fossili di base e significativamente meglio di qualsiasi auto ibrida. Evviva! Per ottenere un trasporto economico, non siamo costretti a stringerci tutti insieme sui mezzi pubblici – possiamo ancora sfrecciare intorno, godendoci tutti i piaceri e le libertà di un viaggio da solista, grazie ai veicoli elettrici.

Figura 20.22. Tesla Roadster: 15 kWh per 100 km. `www.teslamotors.com`.

Questo momento di festa sembra un buon momento per svelare il grande schema riassuntivo di questo capitolo, la Figura 20.23, la quale mostra il fabbisogno energetico di tutte le forme di trasporto passeggeri che

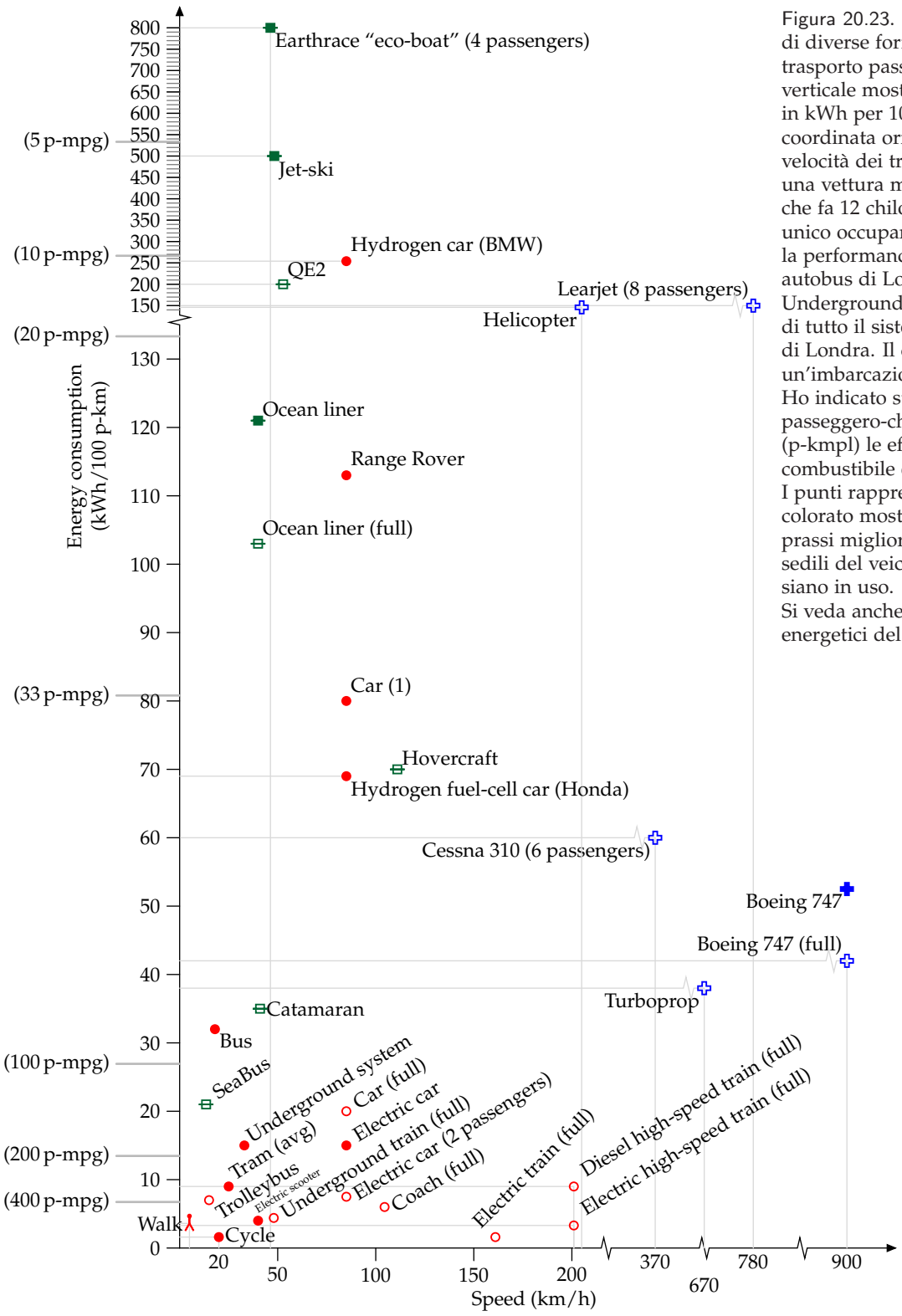


Figura 20.23. Fabbisogno energetico di diverse forme di trasporto passeggeri. La coordinata verticale mostra il consumo di energia in kWh per 100 passeggero-km. La coordinata orizzontale indica la velocità dei trasporti. La "Auto (1)" è una vettura media del Regno Unito che fa 12 chilometri per litro, con un unico occupante. Il "Bus" rappresenta la performance media di tutti gli autobus di Londra. Il "sistema Underground" mostra le prestazioni di tutto il sistema della metropolitana di Londra. Il catamarano è un'imbarcazione con motore diesel. Ho indicato sul lato sinistro in passeggero-chilometri per litro (p-kmpl) le efficienze in termini di combustibile equivalente.
I punti rappresentati con il solo bordo colorato mostrano le prestazioni nella prassi migliore, assumendo che tutti i sedili del veicolo siano in uso.
Si veda anche figura 15.8 (requisiti energetici del trasporto merci).

abbiamo finora discusso ed un paio di cui ancora non abbiamo parlato.

OK, la gara è finita ed ho annunciato due vincitori – mezzi pubblici e veicoli elettrici. Ma ci sono anche altre opzioni che attraversano la linea di arrivo? Dobbiamo ancora ascoltare l'auto alimentata ad aria compressa e l'auto ad idrogeno. Se una di queste risulta essere migliore delle auto elettriche, non influenzerà certo di molto il quadro a lungo termine: quale che sia di queste tre tecnologie quella che sceglieremo per i nostri veicoli, essi verrebbero ricaricati utilizzando l'energia generata da una fonte "verde".

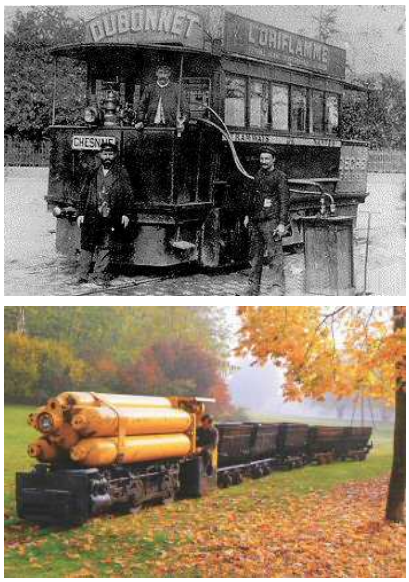


Figura 20.24. In alto: Un tram ad aria compressa che fa il pieno di aria e vapore a Nantes. Alimentare i tram di Nantes impiegava 4.4 kg di carbone (36 kWh) per veicolo-km, ovvero 115 kWh per 100 p-km, quando i tram erano al completo. [5qhvcb]
In basso: Una locomotiva ad aria compressa; peso 9.2 t, pressione 175 bar, potenza 26 kW; foto gentilmente messe a disposizione da Rüdiger Fach, Rolf-Dieter Reichert e Frankfurter Feldbahnmuseum.

Auto ad aria compressa

I veicoli alimentati ad aria non sono una novità. Centinaia di tram alimentati ad aria compressa ed acqua calda solcavano le strade di Nantes e Parigi nel 1879-1911. La Figura 20.24 mostra una locomotiva pneumatica tedesca del 1958. Penso che in termini di efficienza energetica la tecnica dell'aria compressa non sia altrettanto valida quanto le batterie elettriche, per immagazzinare energia. Il problema è che l'aria comprimendosi genera *calore*, che è improbabile sia utilizzato in modo efficiente, mentre in espansione genera *freddo*, un altro sottoprodotto che è improbabile possa essere utilizzato in modo efficiente. Ma l'aria compressa può essere una tecnologia superiore alle batterie elettriche in altri modi. Ad esempio, l'aria può venire compressa migliaia di volte e non si consuma! È interessante notare, tuttavia, che il primo prodotto messo in vendita dalla società Aircar è in realtà uno scooter *elettrico*. [`www.theaircar.com/acf`]

Ci sono voci circa la produzione di auto ad aria da parte della Tata Motors in India, ma è difficile essere sicuri che il veicolo ad aria compressa stia per vedere una ripresa, dato che nessuno ha pubblicato le specifiche di eventuali prototipi moderni. Ecco il limite fondamentale: la densità dell'energia immagazzinata nell'aria compressa è solo grosso modo 11–28 Wh per kg, un valore simile a quello delle batterie piombo-acido e circa cinque volte inferiore a quello delle batterie agli ioni di litio. (Si veda figura 26.13, p. 220, per i dettagli di altre tecnologie di stoccaggio). Pertanto, la scelta di un'auto ad aria compressa sarà sempre e solo tanto buona quanto quella nella gamma delle prime auto elettriche. I sistemi di stoccaggio ad aria compressa hanno tre vantaggi rispetto alle batterie: maggiore durata, fabbricazione più economica e meno sostanze chimiche sgradevoli.

Auto ad idrogeno – dirigibili su quattro ruote

Penso che quello dell'idrogeno sia un carrozzone mediatico stra-pubblicizzato. Sarò lieto di essere smentito, ma io non vedo come l'idrogeno stia lì pronto ad aiutarci con i nostri problemi energetici. L'idrogeno non è una *fonte* miracolosa di energia, esso è viceversa solo un *vettore*, come una batteria ricaricabile. Ed è un vettore di energia piuttosto inefficiente, con un sacco di difetti pratici.

L' "economia dell'idrogeno" ha ricevuto sostegno da parte della rivista *Nature* in una rubrica in cui si tessevano le lodi del governatore della California Arnold Schwarzenegger, perché riempiva un Hummer di idrogeno (figura 20.25). L'articolo di Nature lodava la visione di Arnold, ovvero il fatto che si rivolgesse a vetture alimentate ad idrogeno in sostituzione dei "modelli inquinanti", con la seguente citazione: "il governatore è un eroe d'azione per il clima nel mondo reale". Ma la domanda fondamentale, che si deve porre quando tale eroismo in salsa d'idrogeno viene messo in mostra, è questa: "Donde viene l'*energia* con cui *fare* l'idrogeno?" Inoltre, la conversione di energia da e per l'idrogeno può essere fatta solo in modo inefficiente – almeno, con la tecnologia di oggigiorno.

Qui ci sono alcuni numeri.

- Nel progetto CUTE (Clean Urban Transport for Europe [Trasporto Urbano Pulito per l'Europa. (N.d.T.)]), che aveva lo scopo di dimostrare la fattibilità e l'affidabilità di autobus a celle a combustibile e tecnologia dell'idrogeno, alimentare gli autobus ad idrogeno ha richiesto tra l'80% e il 200% *in più* di energia rispetto ai bus diesel di riferimento.

- Alimentare *Hydrogen 7*, l'auto ad idrogeno fabbricata dalla BMW , richiede 254 kWh per 100 km – il *220% in più* di energia rispetto ad un'auto media europea.

Se il nostro compito consistesse nel fare il seguente invito: "smettete pure di usare i combustibili fossili per i trasporti, tenete conto che *infinite* quantità di energia elettrica verde sono a vostra disposizione gratuitamente"; allora, ovviamente, potrebbe concorrere a risolvere i problemi del trasporto anche una soluzione energetica dissoluta, quale è l'idrogeno (sebbene l'idrogeno debba affrontare anche altri problemi). Ma l'*elettricità verde non è gratis*. Infatti, ottenere elettricità verde sulla scala dei nostri consumi di corrente sarà faccenda assai impegnativa. La sfida ai combustibili fossili è una sfida energetica. Il problema del cambiamento climatico è un problema energetico. Abbiamo bisogno di concentrarci su soluzioni che utilizzano meno energia, non "soluzioni" che ne usano di più! *Non conosco alcuna forma di trasporto terrestre il cui consumo energetico sia peggiore di questa vettura a idrogeno*. (Gli unici metodi di trasporto che so essere peggiori sono le moto d'acqua – con circa 500 kWh per 100 km – ed il motoscafo alimentato a bio-diesel *Earthrace*, che per assurdità è chiamato eco-barca, mentre utilizza 800 kWh per 100 p-km.)

I sostenitori dell'idrogeno possono dire che "la BMW Hydrogen 7 è solo un prototipo e si tratta di una vettura di lusso con un sacco di muscoli – si tratta di una tecnologia che presto diverrà più efficiente". Beh, lo spero proprio, perché ha un sacco da recuperare. Anche la Tesla Roadster (figura 20.22) è un primo prototipo ed è pure una vettura di lusso con un sacco di muscoli. Eppure è più di dieci volte più efficiente della Serie 7 ad idrogeno! Sentitevi liberi di puntare i vostri soldi sul cavallo

Figura 20.25. L'Hummer H2H: ecco come abbracciare la rivoluzione verde, alla maniera degli Americani. Foto per gentile concessione della General Motors.

Figura 20.26. BMW Hydrogen 7. Consumi energetici: 254 kWh per 100 km. Foto di BMW.

Figura 20.27. La "eco-barca" Earthrace. Foto di David Castor.

chiamato idrogeno, se è questo che volete, e se alla fine vincerà, bene. Tuttavia, appare da sciocchi sostenere il cavallo che è così indietro nella corsa. Basta guardare la figura 20.23 – se non avessi schiacciato la parte superiore dell'asse verticale, l'auto ad idrogeno neanche sarebbe apparsa sulla pagina!

Sì, l'auto a celle a combustibile della Honda, la FCX Clarity, fa di meglio – viaggia a 69 kWh per 100 km – ma la mia previsione è che, una volta finito tutto quello strombazzare sulle "emissioni-zero", si troverà che le auto ad idrogeno utilizzano né più né meno la stessa energia di una vettura media di oggi che va a combustibili fossili.

Figura 20.28. La berlina Honda FCX Clarity ad idrogeno con sistema di celle a combustibile e con Jamie Lee Curtis a fare da scala di riferimento. Foto per gentile concessione di `automobiles.honda.com`.

Ecco qualche altro problema con l'idrogeno. L'idrogeno, quale mezzo di stoccaggio dell'energia, è meno conveniente della maggior parte dei combustibili liquidi, a causa della sua massa, nel caso in cui sia immagazzinato come gas ad alta pressione o come liquido (il che richiede temperature inferiori a $-253\,^{\circ}$C [punto di ebollizione dell'idrogeno. (N.d.T.)]). Anche ad una pressione di 700 bar (il che richiede un recipiente a pressione con un certo peso) la sua densità di energia (energia per unità di volume) è pari al 22% di quella della benzina. Il serbatoio criogenico della BMW Hydrogen 7 pesa 120 kg e stocca 8 kg di idrogeno. Inoltre, l'idrogeno si riduce gradualmente evaporando dai serbatoi criogenici che lo tengono stoccato al freddo. Se si parcheggia la propria auto ad idrogeno presso una stazione ferroviaria con il serbatoio pieno e si torna due o tre settimane dopo, ci si deve aspettare di trovare che la maggior parte dell'idrogeno se n'è andata.

Alcune domande riguardo i veicoli elettrici

Si è dimostrato che le auto elettriche sono più efficienti rispetto alle auto a combustibili fossili. Ma sono sempre meglio anche se il nostro obiettivo è quello di ridurre le emissioni di CO_2 e l'elettricità continua ad essere generata da centrali elettriche a combustibili fossili?

Questo è un calcolo piuttosto facile da fare. Assunto che il costo energetico del veicolo elettrico è di 20 kWh(e) ogni 100 km. (Ritengo che 15 kWh(e) ogni 100 km sia perfettamente plausibile, ma giochiamo a fare gli scettici in questo calcolo). Se la rete elettrica ha una impronta di carbonio pari a 500 g per kWh(e) , allora le emissioni effettive del veicolo ammontano a **100 g CO_2 per km**, tanto quanto per le migliori auto a combustibili fossili (figura 20.9). Dunque, si conclude che il passaggio alle auto elettriche è *già* di per sé una buona idea, anche prima di rendere verde la nostra fornitura elettrica.

Le auto elettriche, come quelle a combustibili fossili, hanno costi sia di produzione che di utilizzo. Le auto elettriche possono costare anche di meno per quanto riguarda l'utilizzo, ma se le batterie non durano

molto a lungo, non si dovrebbe prestare maggiore attenzione ai costi di produzione?

Sì, questo è un buon punto. Il mio diagramma sul trasporto mostra soltanto il costo inerente l'utilizzo. Qualora le auto elettriche necessitino di nuove batterie ogni pochi anni, i miei numeri hanno buone probabilità di essere sottostimati. Le batterie in una Prius dovrebbero durare solo 10 anni ed una nuova serie costerebbe £3500. Ci sarà qualcuno che ancora voglia possedere una Prius vecchia di dieci anni e pagare quel costo? Una previsione possibile è che la maggior parte delle Prius saranno cestinate all'età di 10 anni. Questa è certamente una preoccupazione che riguarda tutti i veicoli elettrici dotati di batterie. Credo di essere ottimista sul fatto che, man mano che si passerà ai veicoli elettrici, la tecnologia delle batterie andrà migliorando.

Vivo in un posto caldo. Come potrei guidare un'auto elettrica? Pretendo di avere a disposizione l'aria condizionata e questa è affamata di potenza!

C'è una soluzione elegante per questa richiesta: montare 4 m^2 di pannelli fotovoltaici sulle superfici rivolte verso l'alto della vettura elettrica. Se l'aria condizionata è necessaria, il sole di sicuro brillerà. Pannelli efficienti al 20% genereranno fino a 800 W, il che è sufficiente per alimentare un macchinario per l'aria condizionata. I pannelli possono anche apportare un utile contributo alla ricarica della vettura quando è parcheggiata. Un sistema di raffreddamento del veicolo alimentato ad energia solare è stato incluso in una Mazda nel 1993; le celle solari sono state incorporate nel tettuccio apribile in vetro.

Vivo in un posto freddo. Come potrei guidare un'auto elettrica? Pretendo di avere a disposizione il riscaldamento e questo è affamato di potenza!

Il motore di un veicolo elettrico, quando in funzione, impiegherà qualcosa come 10 kW di media, con un'efficienza del 90–95%. Un po' della potenza viene persa, ossia il restante 5–10%, venendo dissipata come calore nel motore. È possibile che le auto elettriche destinate all'utilizzo in luoghi freddi vengano progettate con cura, facendo in modo che il calore generato dal motore, che potrebbe ammontare a 250 or 500 W, possa essere convogliato dal motore all'interno della vettura. Tutta questa potenza potrebbe fornire un significativo disappannamento dei parabrezza oppure riscaldamento dei corpi.

Le batterie agli ioni di litio sono sicure in caso di incidente?

Alcune batterie agli ioni di litio non sono sicure in caso di cortocircuito o surriscaldamento, ma l'industria delle batterie ne sta producendo di più sicure come quelle al fosfato di litio. C'è un video divertente sulla sicurezza su `www.valence.com`.

C'è abbastanza litio per fabbricare tutte le batterie necessarie per un enorme parco macchine?

Le riserve mondiali di litio sono stimate a 9.5 milioni di tonnellate di depositi minerali (p. 195). Una batteria agli ioni di litio è composta per il 3% di litio. Se si assume che ogni veicolo possiede una batteria da 200 kg, allora si ha bisogno di 6 kg di litio per veicolo. Pertanto, la stima delle riserve in giacimenti sono sufficienti per fabbricare batterie per 1.6 mld di veicoli. Questo numero supera quello delle automobili nel mondo ad oggi (circa 1 miliardo) – ma non è molto di più, quindi la quantità di litio può essere un problema, soprattutto quando si prendono in considerazione le ambizioni concorrenti del drappello "fusione nucleare" (Capitolo 24) riguardo al far ingurgitare litio ai loro reattori. C'è molto più litio, migliaia di volte di più, nell'acqua del mare, sicché forse gli oceani forniranno un sostegno utile. Tuttavia, lo specialista del litio R. Keith Evans dice che "le preoccupazioni per quanto riguarda la disponibilità di litio per le batterie dei veicoli ibridi o elettrici o per altre applicazioni prevedibili sono infondate". E comunque, altre tecnologie, basate su batterie prive di litio come le ricaricabili zinco-aria, sono in fase di sviluppo [`www.revolttechnology.com`]. Penso che l'auto elettrica sia un progetto che avrà successo!

Quale futuro per l'aviazione?

Il superjumbo A380 è definito da Airbus come "aeromobile a bassissimo consumo di carburante". In realtà, brucia solo il 12% in meno di carburante per passeggero di un 747.

La Boeing ha annunciato progressi simili: il loro nuovo 747–8 Intercontinental, strombazzato per le sue proprietà salva-pianeta, è (secondo i messaggi pubblicitari della Boeing) solo il 15% più efficiente rispetto al 747–400.

Questo tasso di progresso un po' striminzito (in contrasto con quello delle automobili, dove i cambiamenti tecnologici offrono miglioramenti di due o anche dieci volte in termini di efficienza) è descritto nel Capitolo Tecnico chapter C. Gli aeroplani si scontrano con un limite fondamentale imposto dalle leggi della fisica. Qualsiasi aereo, qualunque sia la sua dimensione, *deve* spendere un'energia di circa 0.4 kWh per ton-km per mantenersi su e continuare a muoversi. Gli aerei sono già stati ottimizzati in modo fantastico, qui non vi è alcuna prospettiva di miglioramento significativo in termini di efficienza.

Per qualche tempo, ho pensato che che il modo per risolvere il problema del trasporto su lunga distanza fosse quello di ripristinare la modalità di prima degli aerei: i transatlantici. Poi ho guardato i numeri. La triste verità è che i transatlantici usano più energia per passeggero-km dei jumbo jet. Il QE2 usa quattro volte più energia per passeggero-km di un jumbo. OK, è una nave di lusso, si può fare meglio con navi più lente, di classe turistica? Dal 1952 al 1968, il modo economico per attraversare l'Atlantico

Figura 20.29. Airbus A380.

Figura 20.30. TSS Rijndam.

era per mezzo di due navi costruite dagli olandesi e conosciute come "I Gemelli Economici", il Maasdam e la Rijndam. Questi viaggiavano a 16.5 nodi (30.5 km/h), per cui la traversata dalla Gran Bretagna a New York prendeva otto giorni. Il loro consumo di energia, quando trasportavano un carico completo di 893 passeggeri, era di 103 kWh per 100 p-km. Con un tipico livello di occupazione pari all'85%, il consumo energetico ammontava a 121 kWh per 100 pkm – più del doppio di quello dei jumbo jet. Ad essere onesti con le imbarcazioni, esse non sono solo meri strumenti: riforniscono anche passeggeri ed equipaggio di aria calda, acqua calda, luce ed intrattenimento per diversi giorni; tuttavia l'energia risparmiata a casa rimanendo rinchiusi nella barca è un'inezia rispetto al consumo della barca stessa, che, nel caso del QE2, è pari a circa 3000 kWh al giorno per passeggero.

Così, purtroppo, non credo che le imbarcazioni siano destinate a battere gli aeroplani nei consumi energetici. Infine, se vogliamo un modo di viaggiare per grandi distanze senza combustibili fossili, magari le navi a propulsione nucleare sono un'opzione interessante (Figure 20.31 & 20.32).

Figura 20.31. L
a NS Savannah, prima nave da carico commerciale a propulsione nucleare, mentre passa sotto il Golden Gate Bridge nel 1962.

Figura 20.32. La rompighiaccio nucleare Yamal, mentre porta 100 turisti al Polo Nord nel 2001. Foto di Wofratz.

Che dire del trasporto merci?

Il trasporto marittimo internazionale è un utilizzatore sorprendentemente efficiente dei combustibili fossili; sicché tenere il trasporto stradale fuori dai combustibili fossili è una priorità più alta di tenere le navi alla larga dai combustibili fossili. Ma i combustibili fossili sono una risorsa finita ed alla fine le navi dovranno essere alimentate da qualcos'altro. Può darsi che i biocarburanti *siano* una soluzione. Un'altra opzione sarà il nucleare. La prima nave a propulsione nucleare per il trasporto merci e passeggeri è stata la NS Savannah, lanciata nel 1962 come parte dell'iniziativa-progetto *Atomi per la Pace* del Presidente Dwight D. Eisenhower (figura 20.31). Alimentata da un reattore nucleare da 74 MW che guidava un motore da 15 MW, il Savannah aveva una velocità di servizio di 21 nodi (39 km/h) e poteva trasportare 60 passeggeri e 14 000 t di carico. Questo significa un costo di trasporto a pieno carico pari a 0.14 kWh per tonnellata-km. Era in grado di percorrere 500 000 km senza rifornimento. Ci sono già molte navi a propulsione nucleare, sia militari che civili. La Russia possiede dieci rompighiaccio a propulsione nucleare, ad esempio, di cui sette sono ancora attivi [la fabbrica del Baltico, Baltiysky Zavod, dovrebbe sfornare entro il 2017 a San Pietroburgo la più grande nave-rompighiaccio a propulsione nucleare mai vista al mondo – sarà alimentata da 2 PWR RITM-200. (N.d.T.)]. La Figura 20.32 mostra il rompighiaccio nucleare Yamal, che ha due reattori da 171 MW e motori in grado di fornire 55 MW.

"Aspettate! Non si è citata la lievitazione magnetica"

L'azienda tedesca Transrapid, che ha fabbricato il treno Maglev per Shanghai, Cina (figura 20.33), dice che "il sistema superveloce Maglev Transrapid è senza rivali quando si tratta di emissione di rumore, consumo di energia ed uso del suolo. L'innovativo sistema di trasporto senza contatto fornisce mobilità senza che l'ambiente cada nel dimenticatoio". La levitazione magnetica è una delle tante tecnologie che vengono sbandierate quando le persone discutono di questioni energetiche. In termini di consumo energetico, il confronto con gli altri treni veloci in realtà non è così lusinghiero come suggerisce la campagna pubblicitaria. Il sito Transrapid mette a confronto il Transrapid con l'InterCityExpress (ICE), un treno elettrico ad alta velocità.

Figura 20.33. Un treno Maglev all'aeroporto internazionale di Pudong, Shanghai.

"guidare senza ruote, volare senza ali."

Foto di Alex Needham.

Treni ad alta velocità comparati a 200 km/h (125mph)	
Transrapid	2.2 kWh per 100 posti-km
ICE	2.9 kWh per 100 posti-km

I motivi principali per cui il Maglev è leggermente migliore rispetto all'ICE sono: il motore a propulsione magnetica ha un'alta efficienza; il treno stesso ha poca massa, dato che la maggior parte del sistema di propulsione è nella pista, piuttosto che nel treno; inoltre, all'interno del treno ci stanno più passeggeri, perché non occorre spazio per i motori. Oh, e forse perché i dati provengono dal sito web della società Maglev, quindi sono predisposti per far sembrare il Maglev migliore!

Per inciso, le persone che hanno visto il treno Transrapid di Shanghai mi dicono che, a tutta velocità, si tratta di un affare "silenzioso più o meno quanto un aereo a reazione".

Figura 20.34. Nove su dieci veicoli a Londra sono G-Wiz. (Ed il 95% delle statistiche sono inventate).

Note ed approfondimenti

p.

131 *Una statistica ampiamente citata dice: "Solo l'1% dell'energia del combustibile in un auto va nello spostare il conducente".* In effetti, la percentuale di questa falsa credenza varia in dimensioni come ci si sposta da una comunità urbana all'altra. Alcuni dicono: "il 5% dell'energia va nello spostare il conducente". Altri dicono: "soli *tre decimi di 1 percento* dell'energia del combustibile va nello spostare il conducente". [4qgg8q] La mia personale deduzione, detto tra parentesi, è che nessuna di queste statistiche è corretta o di alcun aiuto.

132 *Le prestazioni di una bicicletta sono all'incirca quelle di un'auto ecologica.* Andare in giro in bici con un velocipede che trasporta una singola persona costa circa 1.6 kWh ogni 100 km, assumendo una velocità di 20 km/h. Per dettagli e riferimenti, si veda il Capitolo A, p. 291.

– *Il treno ad 8 carrozze da Cambridge a Londra, fermo al binario* (figura 20.4), pesa 275 tonnellate e può trasportare 584 passeggeri seduti. La sua velocità massima è di 100 mph (161 km/h) e la potenza in uscita 1.5 MW. Se tutti i posti sono occupati, questo treno alla velocità massima consuma al massimo 1.6 kWh per 100 passeggero-km.

133 *Metropolitana di Londra*. Un treno della linea Victoria è composto da quattro vetture da 30.5 tonnellate e quattro da 20.5 tonnellate (le prime portano i motori). Carico, pesa in media 228 tonnellate. La velocità massima è di 73 chilometri orari. La velocità media è di 50 km/h. Un treno con la maggior parte dei sedili occupati trasporta circa 350 passeggeri; stipato, ne contiene circa 620. Il consumo di energia nelle ore di punta è di circa 4.4 kWh per 100 passeggero-km (Catling, 1966).

– *treno ad alta velocità*.
Un treno intercity 125 con motore diesel (a destra in figura 20.5) pesa 410 t. Quando si viaggia a 125 mph [201.2 km/h. (N.d.T.)], la potenza erogata "sul binario" è di 2.6 MW. Il numero di passeggeri in un treno al completo è di circa 500. Il consumo medio di carburante è di circa 0.84 litri di gasolio ogni 100 posti-km [`5o5x5m`], che equivale ad un costo di trasporto di circa 9 kWh per 100 posto-km. Il treno elettrico Class-91 (a sinistra in figura 20.5) viaggia a 140 mph (225 km/h) ed utilizza 4.5 MW. Secondo Roger Kemp, il consumo medio di energia di questo treno è di 3 kWh per 100 posto-km [`5o5x5m`]. Il documento del governo [`5fbeg9`] dice che sulla linea principale della Costa Est come su quella della Costa Ovest i treni consumano circa 15 kWh per km (qui si intende il treno nel suo complesso). Il numero dei posti in ciascun treno è 526 o 470 rispettivamente. Si hanno, dunque, 2.9–3.2 kWh per 100 posto-km.

– *il costo energetico complessivo di tutti i treni della metropolitana di Londra è stato di 15 kWh per 100 p-km. . . . Il costo energetico di tutti gli autobus di Londra è stato di 32 kWh per 100 p-km*. Fonte: [`679rpc`]. Fonte per le velocità di treni ed autobus: Ridley and Catling (1982).

134 *Croydon Tramlink*.
`www.tfl.gov.uk/assets/downloads/corporate/TfL-environment-report-2007.pdf`, `www.tfl.gov.uk/assets/downloads/corporate/London-Travel-Report-2007-final.pdf`, `www.croydon-tramlink.co.uk`.

135 *. . . fornitura di eccellenti strutture ed impianti per i velocipedi . . .* La guida del Regno Unito per la progettazione delle strade [`www.manualforstreets.org.uk`] incoraggia progetti che rendano naturale una velocità di 20 miglia all'ora [32.2 km/h – n.d.t.]. Si veda anche Franklin (2007).

137 *Un metodo semplice ed equo per la gestione dei carichi di congestione*. Ho imparato da Stephen Salter un modo brillante per automatizzare i carichi di congestione. Una semplice tassa di congestione quotidiana, come quella riscossa a Londra, manda solo un segnale pressapochista ai conducenti; una volta che un proprietario di auto ha deciso di pagare il biglietto giornaliero e guida in una zona di congestione, non ha alcun incentivo a guidare *poco*. Né viene premiato con un qualche sconto se sceglie accuratamente nella zona itinerari che non sono congestionati.

Figura 20.35. 100 km in una macchina con una sola persona a bordo, a fronte di 100 km su di un treno elettrico ad alta velocità ed al completo.

Figura 20.36. I tram funzionano bene ad Istanbul come a Praga.

Invece di avere un'autorità centralizzata che decide in anticipo quando e dove si trovano le zone di congestione, con il costoso ed invadente monitoraggio e la registrazione dei movimenti dei veicoli in entrata in tutte quelle zone, Salter propone un metodo semplice, decentralizzato ed anonimo per chi guida in condizioni di traffico lento e pesante, laddove tali condizioni realmente sussistono. Il sistema dovrebbe essere messo in funzione in tutta la nazione. Ecco come funziona. Vogliamo un dispositivo che risponde alla domanda: "quanto è congestionato il traffico in cui sto guidando?" Una buona misura della congestione è: "quanti altri veicoli in azione si trovano vicino al mio?" Nel traffico in rapido movimento, la distanza tra i veicoli è più grande che nel traffico lento. Il traffico che lentamente avanza in noiose code è quello dove ci si ritrova più densamente impacchettati. Il numero di veicoli attivi nelle vicinanze può essere percepito in forma anonima inserendo in ogni veicolo una ricetrasmittente radio (come un telefono cellulare molto economico) che trasmetta dei piccoli segnali radio ad un rateo costante, ogni volta che il motore è in funzione, e che conteggi il numero dei bip provenienti dagli altri veicoli. La tassa di congestione sarebbe proporzionale al numero di segnali acustici ricevuti; questa tassa potrebbe essere pagata presso le stazioni di rifornimento ogni volta che il veicolo viene rifornito. La ricetrasmittente andrebbe a sostituire il disco del bollo corrente.

138 *idraulica e volani recuperano almeno il 70% dell'energia di frenata.* L'aria compressa viene utilizzata per la frenata rigenerativa nei camion; `eaton.com` sostiene che "l'assistenza prestata dal sistema idraulico" cattura il 70% dell'energia cinetica. [`5cp27j`]
Anche il sistema a volano della `flybridsystems.com` cattura il 70% dell'energia cinetica. `www.flybridsystems.com/F1System.html`
La frenata rigenerativa elettrica recupera il 50%. Fonte: E4tech (2007).

139 *Batterie elettriche in grado di fornire 60 kW peserebbero circa 200 kg.* Delle buone batterie agli ioni di litio hanno una potenza specifica di 300 W/kg (Horie et al., 1997; Mindl, 2003).

– *L'auto media del Regno Unito emette 168 g CO_2 per km.* Questi i numeri per l'anno 2006 (King, 2008). Le emissioni medie di un nuovo veicolo passeggeri negli USA ammontavano a 255 g per km (King, 2008).

– *La Toyota Prius ha un motore più efficiente*. Il motore a benzina della Prius utilizza il ciclo Atkinson e non il ciclo Otto convenzionale. Mischiando con astuzia la potenza elettrica e quella della benzina per assecondare il mutare delle esigenze del guidatore, la Prius si arrangia con un motore più piccolo del normale per una macchina del suo peso e converte la benzina in lavoro in un modo più efficiente rispetto ad un tradizionale motore a benzina.

– *Le tecnologie ibride offrono un risparmio di carburante pari al 20% o 30%*. Ad esempio, dal rapporto di ricerca dell'Hitachi che descrive i treni ibridi (Kaneko et al., 2004): la produzione di energia ad alta efficienza e la frenata rigenerativa "dovrebbero offrire un risparmio di carburante di circa il 20% rispetto ai treni diesel convenzionali".

140 *Solo l'8.3% dei pendolari viaggia per più di 30 km per recarsi sul posto di lavoro.* Fonte: Eddington (2006). Quanto dipenda l'autonomia di un'auto elettrica dalle dimensioni della sua batteria è discusso nel Capitolo A (p. 290).

140 *Un sacco di veicoli elettrici*. Eccoli qui di seguito tutti elencati, senza alcun ordine particolare. Le performance sono perlopiù quelle fornite dai produttori. Come abbiamo visto a pagina 140, le prestazioni nella vita reale non sempre corrispondono alle affermazioni dei produttori.

Th!nk Auto elettriche dalla Norvegia. La cinque-porte Th!nk Ox ha un'autonomia di 200 km. Le sue batterie pesano 350 kg e la macchina pesa in tutto 1500 kg. I suoi consumi energetici ammontano approssimativamente a 20 kWh per 100 km. `www.think.no`

Smart elettrica "La versione elettrica è alimentata da un motore a 40 bhp [40 break-horsepower sono circa 41 cv (metric-horsepower). (N.d.T.)], ha un'autonomia di 113 km ed una velocità massima di 113 km/h.

La ricarica avviene attraverso una presa di corrente standard e costa circa £1.20, producendo l'equivalente di 60 g/km di emissioni di anidride carbonica presso la centrale elettrica. [cfr. l'equivalente a benzina: 116 g/km.] Una ricarica completa richiede circa otto ore, ma la batteria può essere portata da una condizione di scarica all'80% ad una di carica all'80% in circa tre ore e mezza". [`www.whatcar.com/news-article.aspx?NA=226488`]

Berlingo Electrique 500E Questo furgoncino per utilizzo urbano (figura 20.20), dispone di 27 batterie al nichel-cadmio ed un motore da 28 kW. Può trasportare un carico utile di 500 kg. Velocità massima: 100 km/h. Autonomia: 100 km. 25 kWh per 100 km. (Stima gentilmente fornitaci da un possessore di Berlingo). [`4wm2w4`]

i MiEV Questa auto elettrica è progettata per avere un'autonomia di 160 km con un pacco batterie da 16 kWh. Il che significa 10 kWh per 100 km – meglio della G-Wiz – e, mentre è impresa ardua far stare due Europei adulti in una G-Wiz, il prototipo della Mitsubishi ha quattro porte e quattro posti a grandezza naturale (figura 20.38). [`658ode`]

EV1 La due posti della General Motors aveva un'autonomia oscillante tra i 120 e 240 km per carica, con batterie al nichel-metallo idruro accumulanti 26.4 kWh. Questo significa un consumo di energia compreso tra 11 e 22 kWh per 100 km.

La Lightning (figura 20.39) ha quattro motori da 120 kW senza spazzole [motore elettrico ad eccitazione indipendente, senza contatti elettrici striscianti. (N.d.T.)], uno per ogni ruota, frenata rigenerativa e ricarica veloce Nanosafe con batterie al litio-titanato. Una capacità di 36 kWh le dà un'autonomia di 200 miglia (320 km). Da cui 11 kWh per 100 km.

Aptera Questo fantastico pesce "svicolone" è un veicolo a due posti, che si dice abbia un costo energetico di 6 kWh per 100 km. Il coefficiente di resistenza aerodinamica è pari a 0.11 (figura 20.40). I modelli elettrici ed ibridi si stanno evolvendo.

Figura 20.37. Th!nk Ox. Foto dal sito `www.think.no`.

Figura 20.38. La i MiEV della Mitsubishi Motors Corporation. Motore da 47 kW; peso: 1080 kg; velocità massima: 130 km/h.

Figura 20.39. La Lightning: 11 kWh per 100 km. Foto dal sito `www.lightningcarcompany.co.uk`.

Figura 20.40. la Aptera. 6 kWh per 100 km. Foto dal sito `www.aptera.com`.

Loremo Come la Aptera, la Loremo (figura 20.41) ha piccola area frontale e basso coefficiente di resistenza (0.2) e presto sarà disponibile in entrambe le versioni a combustibili fossili ed elettrica. Ha due posti per adulti e due seggiolini orientati per i piccini. La Loremo EV avrà batterie agli ioni di litio e si prevede presenti un costo energetico di 6 kWh per 100 km, una velocità massima di 170 km/h ed un'autonomia di 153 km. Il peso è di 600 kg.

Figura 20.41. La Loremo. 6 kWh per 100 km. Foto dal sito `evolution.loremo.com`.

eBox La eBox ha una batteria agli ioni di litio con una capacità di 35 kWh ed un peso di 280 kg; l'autonomia è di 225–290 chilometri. Il motore ha una potenza di picco pari a 120 kW e può produrre una potenza costante di 50 kW. Consumi energetici: 12 kWh per 100 km.

Ze-0 Auto a cinque posti e cinque porte. Velocità massima: 81 km/h. Autonomia: 81 chilometri. Peso, batterie incluse: 1350 kg. Batterie al piombo-acido con capacità di 18 kWh. Motore: 15 kW. 22.4 kWh per 100 km.

e500 Auto simile all'italiana Fiat 500, con 2 porte e 4 posti. Velocità massima: 97 km/h. Autonomia di guida in città: 121 Km. Batteria: litio-polimero.

MyCar La MyCar è una due-posti con design italiano. Velocità massima: 65 km/h. Autonomia massima: 97 km. Batteria al piombo-acido.

Mega City Vettura a due posti con potenza continua massima di 4 kW e velocità massima di 65 km/h: 11.5 kWh per 100 km. Peso – da vuota (batterie incluse) – 725 kg. Le batterie al piombo hanno una capacità di 10 kWh.

Xebra Si sostiene abbia un'autonomia di 40 km da una carica di 4.75 kWh. 12 kWh per 100 km. Velocità massima 65 km/h. Batterie al piombo-acido.

TREV La Due-posti ad Energia Rinnovabile [acronimo inglese: Two-Seater Renewable Energy Vehicle . (N.d.T.)] è un prototipo sviluppato dalla University of South Australia (figura 20.42). Questo veicolo a tre ruote ha un'autonomia di 150 km, una velocità massima di 120 km/h ed una massa di 300 kg. Le batterie sono al litio-polimero e pesano 45 kg. Durante un vero viaggio di 3000 km, il consumo di energia è stato di 6.2 kWh per 100 km.

Figura 20.42. La TREV. 6 kWh per 100 km. Foto dal sito `www.unisa.edu.au`.

Venturi Fetish Ha una batteria da 28 kWh, che pesa 248 kg. L'auto pesa 1000 kg. L'autonomia è di 160–250 km. Da cui 11–17 kWh per 100 km.
`www.venturifetish.fr/fetish.html`

Toyota RAV4 EV Questo veicolo – un mini-SUV completamente elettrico – è stato venduto dalla Toyota dal 1997 al 2003 (figura 20.43). Il RAV4 EV possiede 24 batterie da 12 volt del tipo 95Ah NiMH capaci di accumulare 27.4 kWh di energia; l'autonomia varia da 130 a 190 km. Sicché i consumi energetici ammontano a 14–21 kWh per 100 km. Il RAV4 EV è stato popolare tra le forze di polizia del Jersey.

Figura 20.43. Toyota RAV4 EV. Foto di Kenneth Adelman, dal sito `www.solarwarrior.com`.

Phoenix SUT – un furgone cinque-posti "per usi sportivi e commerciali" made in California – ha un'autonomia "fino a 130 miglia" [209 km. (N.d.T.)] grazie a un pacco batterie agli ioni di litio da 35 kWh. (Da cui 17 kWh per 100 km). Le batterie possono essere ricaricate tramite una presa speciale in 10 minuti.
`www.gizmag.com/go/7446/`

Modec Veicolo per consegne in grado di trasporta due tonnellate ad una distanza di 160 km. Peso a vuoto: 3000 kg. www.modec.co.uk

Smith Ampere Un furgoncino per consegne più piccolo, con batterie agli ioni di litio da 24 kWh. Autonomia: "superiore a 100 miglia" [160 km, circa. (N.d.T.)]. www.smithelectricvehicles.com

Minibus elettrico Dal sito www.smithelectricvehicles.com: pacco batterie agli ioni di litio da 40 kWh. Motore da 90 kW con frenata rigenerativa. Autonomia "fino a 100 miglia". 15 posti. Peso del veicolo vuoto: 3026 kg. Carico utile: 1224 kg. Il che significa una prestazione di al massimo 25 kWh per 100 km. Il veicolo a pieno carico è in grado di fornire trasporto ad un costo impressionante di 2 kWh per 100 p-km.

Pullman elettrico Il bus Thunder Sky ha un'autonomia di 290 km e un tempo di ricarica pari a tre ore. www.thunder-sky.com

Scooter elettrico Il Vectrix è uno scooter notevole (figura 20.44). La sua batteria (al nichel-metallo idruro) ha una capacità di 3.7 kWh. Grazie ad una carica di due ore da una presa elettrica standard, può essere guidato per circa 110 km ad una velocità di 40 km/h. Questo significa 110 km per 3 kWh, ossia 2.75 kWh per 100 km. La velocità massima è di 100 km/h, il peso 210 kg e la potenza di picco 20 kW. www.vectrix.com
Lo scooter "Oxygen Cargo" è più piccolo. Pesa 121 kg, ha un'autonomia di 61 km ed impiega 2–3 ore per ricaricarsi. Potenza di picco: 3.5 kW; velocità massima: 45 km/h. Ha due batterie al litio e frenata rigenerativa. È possibile estenderne l'autonomia aggiungendo due batterie, che accumulano all'incirca 1.2 kWh e pesano 15 kg ciascuna. Consumi energetici: 4 kWh per 100 km.

Figura 20.44. Il Vectrix: 2.75 kWh per 100 km. Foto dal sito www.vectrix.com.

142 *la densità energetica dell'energia stoccata nell'aria compressa è solo circa 11–28 Wh per kg.* Il limite teorico, ipotizzando una compressione isoterma perfetta: se 1 m^3 di aria dell'ambiente viene lentamente compresso in un recipiente da 5 litri a 200 bar, l'energia potenziale immagazzinata ammonta a 0.16 kWh in 1.2 kg di aria. Nella pratica, un contenitore da 5 litri idoneo per questo tipo di pressione pesa circa 7.5 kg se in acciaio o 2 kg usando kevlar o fibra di carbonio e la densità energetica complessiva ottenuta sarebbe di circa 11–28 Wh per kg. La densità di energia teorica rimane la stessa, qualunque sia il volume del contenitore.

143 *Arnold Schwarzenegger ... mentre fa il pieno di idrogeno ad un Hummer*. *Nature* **438**, 24 novembre 2005. Non sto dicendo che l'idrogeno non sarà *mai* di alcuna utilità per i trasporti; ma spererei che una rivista di tal lustro, quale è *Nature*, affrontasse il carrozzone mediatico dell'idrogeno con qualche pensiero critico, non solo euforicamente.

> *Idrogeno e celle a combustibile non sono la strada da percorrere. La decisione da parte dell'amministrazione Bush e dello Stato della California di prendere l'autostrada dell'idrogeno è semplicemente la peggior decisione presa negli ultimi anni.*
> James Woolsey, Presidente del Comitato Consultivo della US Clean Fuels Foundation, 27 novembre 2007.

Nel settembre 2008, *L'Economist* ha scritto "Quasi nessuno contesta che ... alla fine la maggior parte delle vetture saranno alimentate esclusivamente da batterie".
D'altro lato, per sentire qualcosa di più da parte dei sostenitori del trasporto ad idrogeno, si vedano le pagine del Rocky Mountain Institute che riguardano la "HyperCar" www.rmi.org/hypercar/.

– *Nel progetto trasporto Urbano Pulito per l'Europa l'ammontare complessivo dell'energia richiesta per alimentare gli autobus ad idrogeno oscillava tra l'80% ed il 200%* in più *rispetto a quella di riferimento richiesta dagli autobus alimentati a diesel.* Fonte: CUTE (2006); Binder et al. (2006).

– *Rifornire l'auto alimentata ad idrogeno prodotta dalla BMW richiede* tre volte più *energia di una vettura media*. Metà del bagagliaio di una BMW "Hydrogen 7" è occupata dal suo serbatoio per l'idrogeno da 170 litri, che contiene 8 kg di idrogeno, fornendo grazie a questo un'autonomia di 200 km [`news.bbc.co.uk/1/hi/business/6154212.stm`]. Il potere calorifico dell'idrogeno è di 39 kWh per kg ed il costo energetico del produrre idrogeno con il metodo migliore è di 63 kWh per kg (di cui 52 kWh riguardano il gas naturale ed 11 kWh l'energia elettrica) (CUTE, 2006). In questo modo fare il pieno di 8 kg di idrogeno ha un costo energetico di almeno 508 kWh; perciò, se il serbatoio in effetti concede 200 km di autonomia, allora il costo energetico ammonta a 254 kWh per 100 km.

> *La Hydrogen 7 e le sue cuginette ad idrogeno e/o celle a combustibile sono, per molti versi, semplici distrazioni molto appariscenti.*
>
> David Talbot, MIT Technology Review
> `www.technologyreview.com/Energy/18301/`

L'auto a celle a combustibile della Honda, la FCX Clarity, pesa 1625 kg, immagazzina 4.1 kg di idrogeno ad una pressione di 345 bar e si dice che abbia un'autonomia di 280 miglia [451 km. (N.d.T.)], "bruciando" 57 miglia di strada per ogni kg di idrogeno (91 km per kg) in un mix standard di condizioni di guida [`czjjo`], [`5a3ryx`]. Utilizzando Il costo di produzione dell'idrogeno summenzionato ed assumendo che il gas naturale sia la fonte principale di energia, questa autovettura presenta costi inerenti il trasporto pari a 69 kWh per 100 km.

> *Quelli della Honda forse possono prendere in giro i giornalisti inducendoli a pensare che le auto ad idrogeno siano ad "emissioni-zero", ma sfortunatamente non possono abbindolare il clima.*
>
> Merrick Godhaven

146 *Un batteria agli ioni di litio è costituita per il 3% da litio.* Fonte: Fisher et al. (2006).

– *Lo specialista del litio, R. Keith Evans, afferma che "le preoccupazioni inerenti la disponibilità del litio … sono infondate."* – Evans (2008).

147 *Due navi costruite dagli olandesi e conosciute come "I Gemelli Economici".* `www.ssmaritime.com/rijndam-maasdam.htm`. *QE2*: `www.qe2.org.uk`.

148 *Transrapid, treno a levitazione magnetica.* `www.transrapid.de`.

21 Riscaldamento più intelligente

Figura 21.1. Casa mia.

Nel capitolo precedente abbiamo appreso che l'elettrificazione potrebbe ridurre il consumo di energia nei trasporti ad un quinto dei suoi livelli attuali e che muoversi con mezzi pubblici e bicicletta può rivelarsi circa 40 volte più efficiente del guidare auto. Che dire del riscaldamento? Che sorta di risparmio energetico possono offrire tecnologia o cambiamento degli stili di vita?

La potenza utilizzata per riscaldare un edificio è data moltiplicando insieme tre grandezze:

$$\text{potenza utilizzata} = \frac{\text{differenza di temperatura media} \times \text{perdite termiche dell'edificio}}{\text{efficienza del sistema di riscaldamento}}.$$

Spieghiamo questa formula (discussa in dettaglio nel Capitolo Tecnico E) con un esempio. La mia casa è una del tipo semi-indipendente [si trova alla fine di un caseggiato. (N.d.T.)] con tre camere da letto, costruita nel 1940 (figura 21.1). La differenza di temperatura media tra l'interno e l'esterno della casa dipende dalla regolazione del termostato e dalle condizioni climatiche. Se il termostato è permanentemente a 20 °C, la differenza di temperatura media potrebbe essere pari a 9 °C. Le *perdite termiche* dell'edificio descrivono la quantità di calore che esce attraverso pareti, finestre e crepe, in risposta ad una differenza di temperatura ed è chiamata, talvolta, *coefficiente di dispersione termica* dell'edificio. Viene misurata in kWh al giorno per ogni grado di differenza di temperatura. Nel Capitolo E, ho calcolato che nel 2006 la mancata tenuta termica di casa mia ha comportato perdite per 7.7 kWh/gg/°C. Il prodotto

$$\text{differenza di temperatura media} \times \text{perdite termiche dell'edificio}$$

è la velocità a cui il calore fluisce fuori di casa per conduzione e ventilazione [si distingue tra perdite di trasmissione e perdite di ventilazione – il cambio d'aria può essere attivato volutamente, magari per motivi igienici, oppure subito passivamente, perché dovuto all'anermeticità dell'edificio. (N.d.T.)]. Per esempio, se la differenza di temperatura media è di 9 °C, allora la perdita di calore ammonta a

$$9\,°\mathrm{C} \times 7.7\,\mathrm{kWh}/gg/°\mathrm{C} \simeq 70\,\mathrm{kWh}/gg.$$

Infine, per calcolare la potenza necessaria, si divide questa perdita di calore per l'efficienza del sistema di riscaldamento. In casa mia, la caldaia a gas a condensazione ha un rendimento del 90%; si trova così che:

$$\text{potenza utilizzata} = \frac{9\,°\mathrm{C} \times 7.7\,\mathrm{kWh}/gg/°\mathrm{C}}{0.9} = 77\,\mathrm{kWh}/gg.$$

Un valore maggiore rispetto ai requisiti di riscaldamento dell'ambiente stimati nel Capitolo 7. Maggiore per due motivi: in primo luogo, questa formula presuppone che tutto il calore sia fornito dalla caldaia, mentre in realtà un po' di calore è assicurato da guadagni accidentali, ossia dagli occupanti, da aggeggi vari e dal sole. In secondo luogo, nel Capitolo 7 abbiamo ipotizzato che un persona mantenesse a 20 °C per tutto il tempo solo due stanze; mantenere un'intera casa a questa temperatura per tutto il tempo richiederebbe maggior impegno.

OK, come possiamo ridurre la potenza impiegata nel riscaldamento? Beh, ovviamente, ci sono tre linee di attacco.

1. Ridurre la differenza di temperatura media. Ciò può essere ottenuto ruotando i termostati verso il basso (o, se si hanno amici in alto, cambiando il meteo).

2. Ridurre le perdite termiche dell'edificio. Questo può essere fatto migliorando l'isolamento dell'edificio – si pensi a tripli vetri, tenuta stagnae soffici coltri nel soppalco – o, più radicalmente, demolendo l'edificio e sostituendolo con uno avente isolamento migliore, oppure magari vivendo in un edificio di piccole dimensioni a persona. (Le perdite termiche tendono ad essere più grandi più è grande la superficie piana di un edificio, perché in questo caso anche le aree del muro esterno, delle finestre e del tetto tendono ad essere più grandi).

3. Aumentare l'efficienza del sistema di riscaldamento. Qualcuno penserà che un 90% sia difficile da battere, ma in realtà si può fare di meglio, molto.

Tecnologia forte: il termostato

Il termostato (accompagnato da un bel pullover di lana) è difficile da battere, quando si tratta di rapporto qualità-prezzo. Si gira verso il basso e il vostro edificio consuma meno energia. Magia! In Gran Bretagna, per ogni grado in meno, le perdite di calore si riducono di circa il 10%. Ruotando il termostato da 20 °C a 15 °C quasi si dimezzano. Grazie alle eventuali altre fonti di guadagno di calore, nel complesso il risparmio dell'energia impiegata per riscaldare l'edificio sarà persino più grande della riduzione delle perdite di calore.

Purtroppo, però, questa notevole tecnologia per il risparmio energetico ha degli effetti collaterali. Alcuni esseri umani chiamano questo girare il termostato verso il basso un cambiamento dello stile di vita e non ne sono proprio entusiasti. Darò in seguito qualche suggerimento su come aggirare il problema dello stile di vita. Nel frattempo, a riprova che "il componente intelligente più importante in un edificio dotato di riscaldamento intelligente è l'occupante", la figura 21.2 mostra i dati provenienti da uno studio

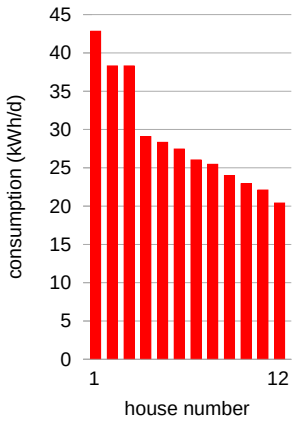


Figura 21.2. Consumo di calore effettivo in 12 case identiche, con sistemi di riscaldamento identici. Tutte le case avevano una superficie di 86 m^2 ed erano state progettate per avere perdite termiche pari a 2.7 kWh/gg/°C. Fonte: Carbon Trust (2007).

della Carbon Trust, riguardante il consumo di calore in dodici case moderne identiche. Questo studio ci permette di fissare imbambolati la famiglia al numero 1, il cui consumo di calore è due volte più grande di quello dei Sig.ri Della Lana, al numero 12. Tuttavia, si dovrebbe prestare attenzione ai numeri: la famiglia al numero 1 utilizza 43 kWh al giorno. Ma se questo vi ha scioccati, aspettate – un momento fa, non ritenevo forse che *la mia* casa potrebbe avere maggiori consumi? Infatti, il mio consumo medio di gas nel periodo 1993-2003 è stato un po' più di 43 kWh al giorno (figura 7.10, p. 59). Ed io che pensavo di essere una persona frugale! Il problema è la *casa*. Tutte le case moderne dello studio Carbon Trust avevano perdite termiche pari a 2.7 kWh/gg/°C, ma la mia casa ne aveva per un ammontare di 7.7 kWh/gg/°C! Ah, le persone che vivono in case-colabrodo...

La guerra alle perdite

Cosa si può fare con le vecchie case-colabrodo, a parte chiamare i bulldozer? La Figura 21.3 mostra le stime del riscaldamento degli ambienti necessario nelle vecchie case indipendenti, semi-indipendenti e a schiera. Le stime per le varie case sono disposte in ordine crescente, ossia in funzione dello sforzo richiesto per rattopparle. L'aggiunta di isolamento nelle intercapedini dei muri [isolamento per pareti ad intercapedine, coibentazione. (N.d.T.)] e nei sottotetti riduce le perdite di calore in una tipica vecchia casa di circa il 25%. Grazie agli altri eventuali apporti secondari ed accidentali di calore, questa riduzione delle perdite pari al 25% si traduce in una riduzione dei consumi concernenti il riscaldamento pari a circa il 40%.

Mettiamo queste idee alla prova.

Un caso di studio

A pagina 59 vi ho introdotti in casa mia. Riprendiamo la storia. Nel 2004 avevo installato una caldaia a condensazione, in sostituzione della vecchia caldaia a gas. (Le caldaie a condensazione utilizzano uno scambiatore di calore per trasferire il calore dai gas esausti all'aria in entrata). Allo stesso tempo ho rimosso il boiler (quindi ora si ha acqua calda solo su richiesta) ed ho posizionato dei termostati su tutti i radiatori delle camere da letto. Insieme con la nuova caldaia a condensazione è arrivato un nuovo regolatore del riscaldamento che mi permette di impostare temperature nominali diverse per le diverse ore del giorno. Con queste modifiche, il mio consumo è diminuito da una media di 50 kWh/gg ad una di circa 32 kWh/gg.

Questa riduzione da 50 a 32 kWh/gg è abbastanza soddisfacente, ma non è sufficiente, se l'obiettivo è quello di ridurre la propria impronta di combustibili fossili al di sotto di una tonnellata di CO_2 all'anno. 32 kWh/gg di gas corrispondono ad oltre 2 tonnellate di CO_2 all'anno.

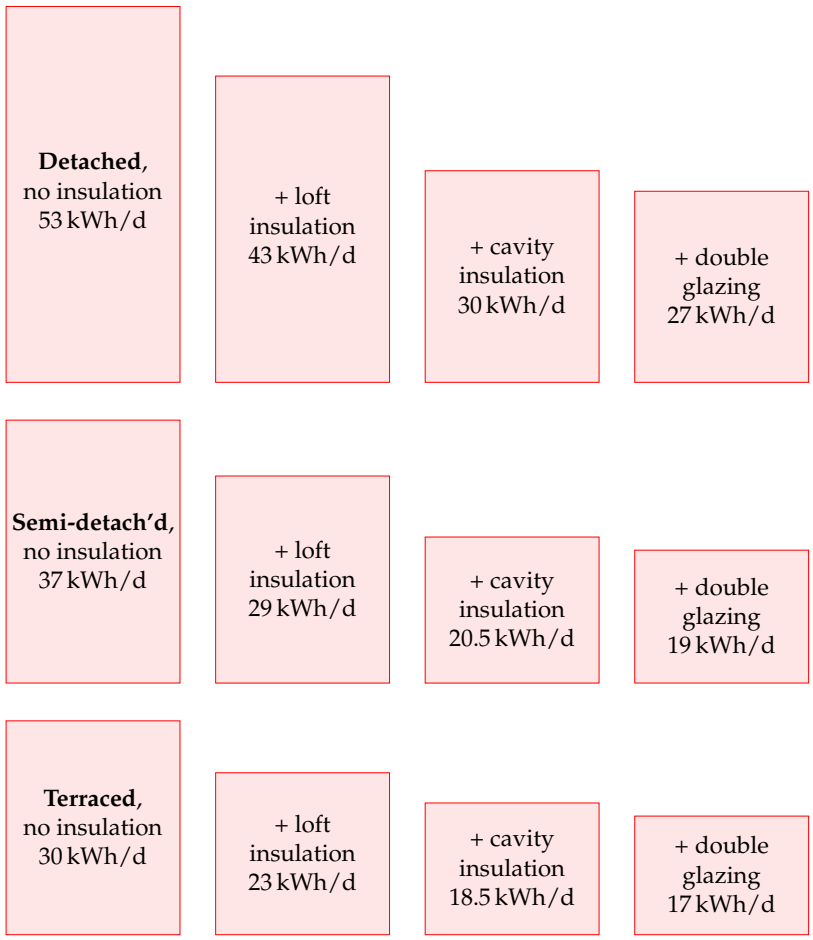


Figura 21.3. Stime del riscaldamento degli ambienti richiesto da una gamma di case del Regno Unito. Dati forniti da Eden and Bending (1985).

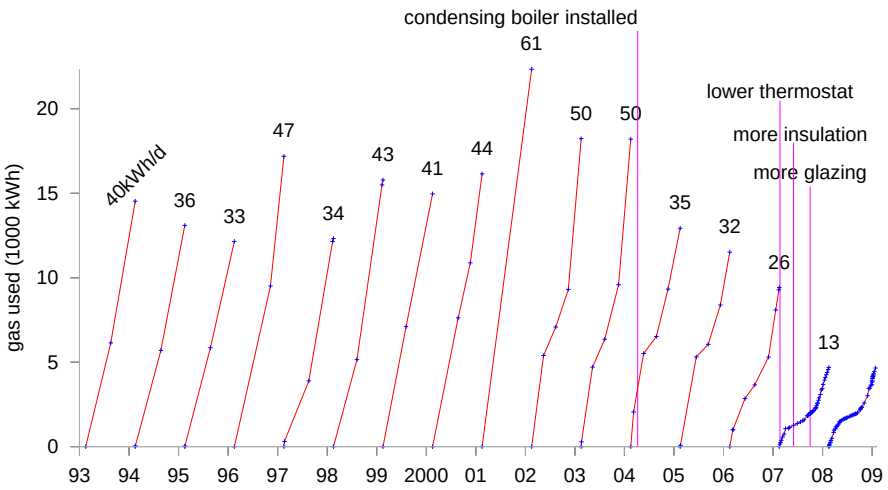


Figura 21.4. I miei consumi domestici di gas, anno per anno dal 1993 al 2007. Ogni riga indica il consumo cumulativo di un anno in kWh. Il numero alla fine di ogni anno è il tasso medio di consumo per lo stesso anno, in kWh al giorno. Le letture del contatore sono indicate dai punti blu. Evidentemente, più spesso leggo il mio contatore, meno gas uso!

Nel 2007 ho iniziato a prestare più attenzione ai miei contatori di energia. Ho installato l'isolamento per pareti ad intercapedine (figura 21.5) e migliorato quello del sottotetto. Ho sostituito la porta a vetro singolo con una a doppio vetro ed ho aggiunto una porta in più, coi doppi vetri, nel portico anteriore (figura 21.6). Cosa più importante di tutto, sono stato più attento nell'impostare il termostato. Questa attenzione ha portato ad un ulteriore dimezzamento del consumo di gas. Risultato: i consumi dell'ultimo anno sono stati pari a 13 kWh/gg!

Figura 21.5. Coibentazione in corso.

Figura 21.6. Una nuova porta d'ingresso.

Dato che questo caso di studio è un tale miscuglio [letteralmente: zuppa di carne in umido. (N.d.T.)] di modifiche di costruzione e modifiche del comportamento, è difficile essere sicuri di quali siano stati i cambiamenti più importanti. Secondo i miei calcoli (nel Capitolo E), le migliorie concernenti l'isolamento hanno ridotto la permeabilità del 25%, da 7.7 kWh/gg/°C a 5.8 kWh/gg/°C. Questo significa ancora avere molte più perdite di qualsiasi casa moderna. È difficile ad un livello frustrante ridurre le perdite termiche di una casa già costruita!

Quindi, il mio consiglio principale è quello di gestire il termostato con astuzia. Qual è un'impostazione ragionevole del termostato cui puntare? Al giorno d'oggi molte persone sembrano pensare che 17 °C siano un freddo insopportabile. Tuttavia, nel 1970 la temperatura media invernale nelle case britanniche era di 13 °C! La percezione umana del caldo dipende sia da quello che si sta facendo sia da quello che si è fatto nell'ultima ora o giù di lì. Il mio suggerimento è: *non pensare in termini di regolazione del termostato.* Invece di fissare il termostato su di un singolo valore, si provi semplicemente a lasciarlo su di un valore molto basso la maggior parte del tempo (diciamo 13 o 15 °C) e ad alzarlo temporaneamente ogni volta che si sente freddo. È come per le luci in una biblioteca. Se vi permettete di porre la domanda: "qual è il livello giusto di luce negli scaffali?" Allora riceverete senza dubbio come risposta: "abbastanza per leggere i titoli dei libri", ma così avrete luci sempre accese. Questa domanda in effetti presuppone che si debba fissare il livello di luce e noi non dobbiamo. Si possono montare interruttori della luce che il lettore può accendere e che si disattivano nuovamente, dopo un tempo adeguato. Analogamente, non c'è bisogno di lasciare i termostati a 20 °C per tutto il tempo.

Prima di lasciare l'argomento impostazioni del termostato, vorrei ricordare l'aria condizionata. Non vi manda letteralmente ai matti entrare d'estate in un palazzo dove il termostato del condizionamento d'aria è impostato a 18 °C? Questi amministratori pazzoidi stanno sottoponendo tutti a temperature che in inverno susciterebbero le loro lagnanze per il troppo freddo! In Giappone, le linee guida "CoolBiz" del Governo suggeriscono che l'aria condizionata sia impostata a 28 °C (82 F).

Edifici migliori

Se si ha la possibilità di costruire un edificio nuovo di sana pianta, allora ci sono un sacco di modi per assicurarsi che i consumi per il riscaldamento siano molto più piccoli di quelli in un vecchio edificio. La Figura 21.2 prova che le case moderne sono costruite con standard di isolamento molto migliori rispetto a quelli del 1940. Ma gli standard di costruzione in Gran Bretagna potrebbero essere ulteriormente migliorati, come si discute nel Capitolo E. Le tre idee chiave per ottenere i migliori risultati sono le seguenti: (1) installare in pavimenti, pareti e tetti un isolamento che abbia davvero un certo peso e spessore; (2) assicurasi che l'edificio sia completamente sigillato ed utilizzare la ventilazione attiva per introdurre aria fresca e rimuovere quella stantia e umida, con scambiatori che recuperino in modo passivo buona parte del calore dall'aria rimossa; (3) progettare l'edificio in modo da sfruttare la luce del sole il più possibile.

Il costo energetico del calore

Finora, questo capitolo si è concentrato sul controllo della temperatura e sulle perdite. Ora passiamo al terzo fattore dell'equazione:

$$\text{potenza utilizzata} = \frac{\text{differenza di temperatura media} \times \text{perdite termiche dell'edificio}}{\text{efficienza del sistema di riscaldamento}}.$$

Come si può produrre calore in modo efficiente? Si può ottenere calore a buon mercato? Oggi come oggi, il riscaldamento degli edifici in Gran Bretagna è principalmente fornito dalla combustione di un carburante fossile, il gas naturale, in caldaie con efficienze del 78–90%. Possiamo fare a meno dei combustibili fossili ed al contempo rendere più efficiente il riscaldamento degli edifici?

Una tecnologia che viene presentata come risposta ai problemi di riscaldamento della Gran Bretagna si chiama "cogenerazione" o, in alternativa la cuginetta, "micro-cogenerazione". Spiegherò la generazione combinata di potenza e calore ora, ma sono giunto alla conclusione che si tratti di una cattiva idea, perché esiste una tecnologia migliore per il riscaldamento, chiamata "pompe di calore" e che verrà descritta poche pagine dopo.

Figura 21.7. Eggborough. Una centrale elettrica che non partecipa al riscaldamento intelligente.

Cogenerazione

È opinione comune che le grandi centrali elettriche centralizzate tradizionali siano terribilmente inefficienti, essendo che volenti o nolenti gettano via il calore su per camini e torri di raffreddamento. Una visione più sofisticata riconosce che per trasformare l'energia termica in energia elettrica, si deve inevitabilmente scaricare il calore in un luogo freddo (figura **??**).

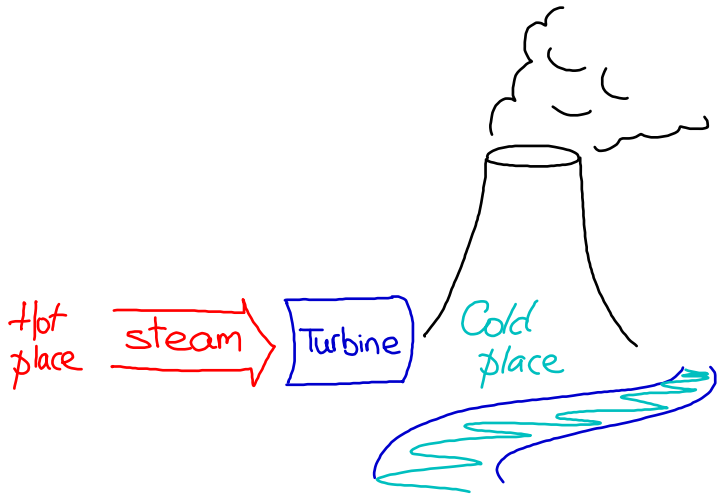


Figura 21.8. Come funziona una centrale elettrica. Ci deve essere un luogo freddo dove il vapore che fa girare la turbina possa condensare.Il luogo freddo è in genere una torre di raffreddamento o fiume.

È così che lavorano le macchine termiche. Ci *deve* essere un luogo freddo. Ma sicuramente, si sostiene, non sarebbe possibile usare gli *edifci* come luogo di discarica per questa "scoria", il calore , invece di torri di raffreddamento o acqua di mare? Questa idea si chiama "generazione combinata di potenza e calore" (CHP) [acronimo inglese: Combined Heat and Power. (N.d.T.)], ossia cogenerazione, ed è stata ampiamente utilizzata in Europa continentale per decenni – in molte città, una grande centrale elettrica è integrata con un sistema di teleriscaldamento . I sostenitori della moderna incarnazione della cogenerazione, la "micro-cogenerazione", suggeriscono di creare minuscole centrali elettriche all'interno di singoli edifici o di piccole collezioni di edifici, di modo che siano forniti calore ed elettricità a quegli edifici ed un po' di elettricità venga esportata alla rete.

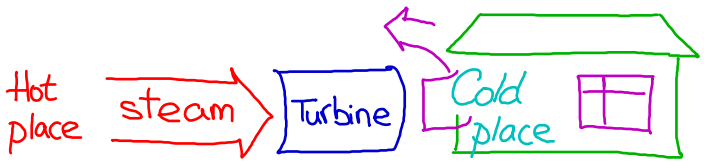


Figura 21.9. Cogenerazione. Il teleriscaldamento assorbe il calore che altrimenti sarebbe stato buttato via attraverso una torre di raffreddamento.

C'è sicuramente qualcosa di vero nell'opinione secondo cui la Gran Bretagna sia piuttosto indietro a proposito di teleriscaldamento e cogenerazione, ma la discussione è ostacolata da una generale mancanza di numeri e da due errori in particolare. Primo, quando si confrontano diversi modi di utilizzare il combustibile, viene usata una misura sbagliata di "efficienza", cioè si usa lo stesso peso per elettricità e calore. In verità l'elettricità è più preziosa del calore. Secondo, è opinione diffusa che la "scoria" calore in una centrale elettrica tradizionale possa essere catturata per uno scopo utile *senza compromettere la produzione di energia elettrica della centrale*. Questo purtroppo non è vero, come mostreranno i numeri. Fornire calore utile ad

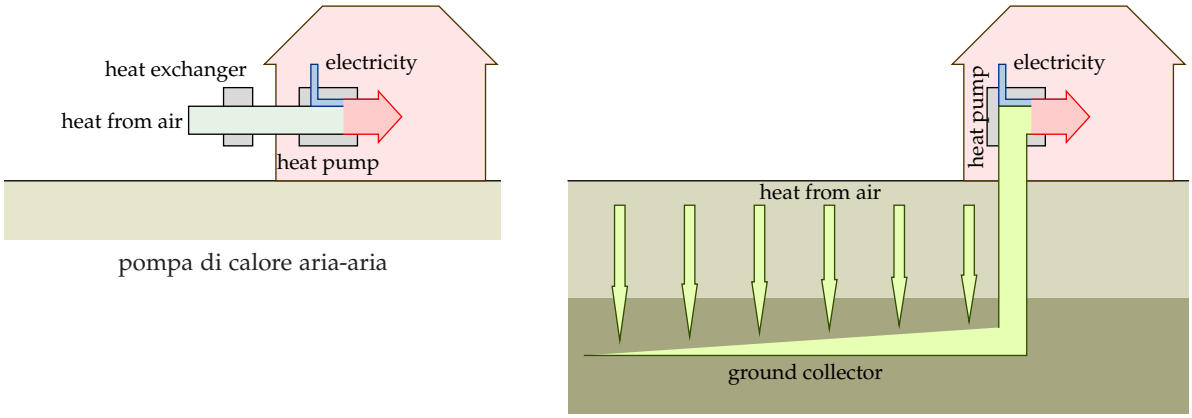


Figura 21.10. Pompe di calore.

un cliente riduce sempre in una certa misura l'energia elettrica prodotta. I reali guadagni netti da cogenerazione sono spesso molto più piccoli di quello che si è indotti a credere dalla battage pubblicitaria.

Un ostacolo finale alla discussione razionale sulla cogenerazione è un mito che è cresciuto di recente, ossia che il decentramento di una tecnologia la rende in qualche modo più verde. Quindi, mentre le grandi centrali elettriche a combustibili fossili centralizzate sono "cattive", stormi di stazioni locali a micro-potenza sono impregnate di bontà. Ma se il decentramento è nella realtà una buona idea, allora "piccolo è bello" dovrebbe essere evidente nei numeri. Il decentramento dovrebbe essere in grado di camminare con le proprie gambe. Quello che i numeri mostrano in realtà è che la produzione *centralizzata* di energia elettrica ha molti vantaggi sia in termini economici che energetici. Solo negli edifici di grandi dimensioni vi è un qualche beneficio per la generazione locale e di solito è solo pari a circa il 10–20%.

Il Governo ha un obiettivo di crescita della produzione combinata di calore ed elettricità per raggiungere i 10 GW di capacità elettrica entro il 2010, ma ritengo che la crescita della cogenerazione alimentata da gas sia un errore. Tale generazione combinata di potenza e calore non è verde: utilizza combustibili fossili e ci tiene bloccati al loro uso continuato. Dato che le pompe di calore sono una tecnologia migliore, credo che dovremmo scavalcare la cogenerazione alimentata a gas e passare direttamente alle pompe di calore.

Pompe di calore

Come il teleriscaldamento e la cogenerazione, le pompe di calore sono già ampiamente utilizzate in Europa continentale, ma stranamente rare in Gran Bretagna. Le pompe di calore sono frigoriferi al contrario. Provate a

sentire il retro del frigorifero: è *caldo*. Un frigorifero trasferisce calore da un posto (il suo interno) ad un altro (il pannello posteriore). Dunque, una maniera di riscaldare un edificio consiste nel rivoltare un frigorifero – si mette *l'interno* del frigorifero in giardino, che così si raffresca, e si lascia il pannello posteriore in cucina, ottenendo di conseguenza il riscaldamento della casa. Ciò che non appare ovvio di questa idea folle è che si tratta di un modo molto efficiente di riscaldare la vostra casa. Per ogni chilowatt di potenza assorbita dalla rete elettrica, il frigorifero al contrario può pompare tre chilowatt di calore dal giardino, di modo che in casa si ha un totale di quattro chilowatt. Pertanto, le pompe di calore sono circa quattro volte più efficienti di una stufa elettrica standard. Posta l'efficienza della stufa elettrica al 100%, quella della pompa di calore è al 400%. L'efficienza di una pompa di calore è di solito chiamata *coefficiente di prestazione* o CoP [acronimo inglese: Coefficient of Performance. (N.d.T.)]. Se l'efficienza è del 400%, il coefficiente di prestazione è 4.

Le pompe di calore possono essere configurate in diversi modi (figura 21.10). Una pompa di calore può raffreddare l'*aria* in giardino utilizzando uno scambiatore di calore (tipicamente una scatola bianca alta 1 metro, come quella in figura 21.11), nel qual caso si ha una pompa di calore aria-aria o aria-acqua [la denominazione delle pompe di calore cambia a seconda del vettore e della sorgente, quindi una distinzione di base può essere anche tra "a sorgente aria", "a sorgente terreno", ossia con sonda geotermica, e "a sorgente acqua". (N.d.T.)]. In alternativa, la pompa può raffreddare la *terra* con tubature sotterranee a grandi anse (molte decine di metri di lunghezza), nel qual caso si chiama pompa di calore geotermica. Il calore può anche essere pompato da fiumi e laghi [pompe di calore acqua-aria o acqua-acqua. (N.d.T.)].

Alcune pompe di calore sono in grado di pompare calore in entrambe le direzioni. Quando una pompa di calore aria-aria gira al contrario, si usa l'elettricità per riscaldare l'aria all'*esterno* dell'edificio e raffreddarla all'*interno*. Questo si chiama climatizzazione. Molti condizionatori d'aria sono, infatti, pompe di calore che lavorano proprio in questo modo. Le pompe di calore geotermiche possono funzionare anche come condizionatori d'aria. Dunque, un singolo apparecchio può essere utilizzato per fornire riscaldamento invernale e rinfrescamento estivo.

La gente a volte dice che le pompe di calore geotermiche utilizzano "energia geotermica", ma questo non è il nome giusto. Come abbiamo visto nel Capitolo 16, l'energia geotermica offre solo un piccolo rivolo di energia per unità di superficie (circa 50 mW/m^2); in molte parti del mondo, le pompe di calore non hanno nulla a che fare con questo stillicidio e possono essere utilizzate sia per il riscaldamento che per il raffreddamento. Le pompe di calore utilizzano semplicemente il terreno come un luogo da cui succhiare calore, o dove scaricarlo. Laddove il calore viene succhiato costantemente, viene in effetti reintegrato calorosamente dal sole.

Rimangono ancora due cose da fare in questo capitolo. Occorre con-

Figura 21.11. Kit interno ed esterno di una pompa di calore aria-aria con un coefficiente di prestazione 4. Il kit interno è accostato ad una penna a sfera, come scala di riferimento. Una di queste unità Fujitsu è in grado di fornire 3.6 kW di riscaldamento utilizzando solo 0.845 kW di corrente elettrica. Può anche funzionare in senso inverso, offrendo 2.6 kW di raffreddamento laddove si utilizzano 0.655 kW di corrente elettrica.

frontare le pompe di calore con la cogenerazione e successivamente discutere di quali siano i limiti delle pompe di calore "geotermiche".

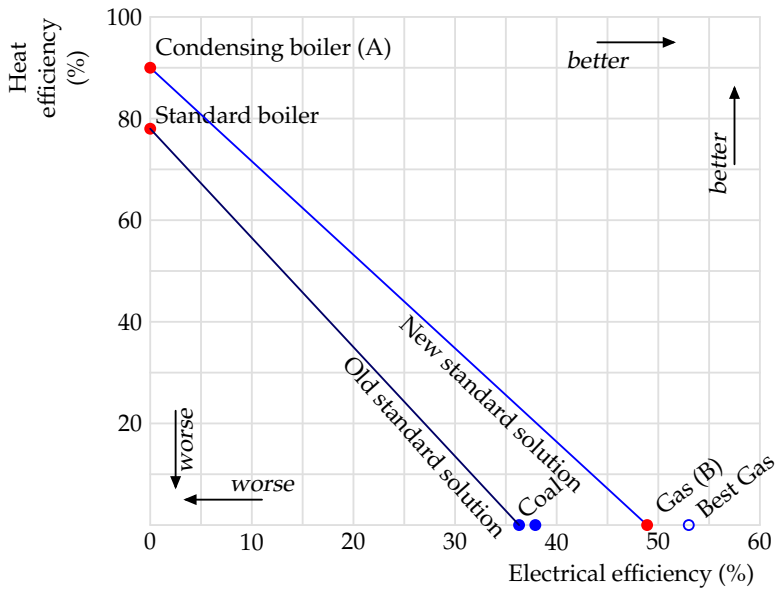
Pompe di calore a confronto con la cogenerazione

C'è stato un tempo in cui ero solito pensare che la cogenerazione fosse un gioco da ragazzi. "Ovviamente, dobbiamo usare il calore scartato dalle centrali elettriche per riscaldare gli edifici e non semplicemente buttarlo via su per una torre di raffreddamento!". Tuttavia, guardando con attenzione i numeri che descrivono le prestazioni reali dei sistemi di cogenerazione, sono giunto alla conclusione che esistano modi migliori di fornire elettricità e riscaldamento degli edifici.

Ho intenzione di costruire un diagramma in tre passaggi. Il diagramma mostrerà quanta energia elettrica o termica possono essere fornite a partire dall'energia chimica. L'asse orizzontale mostra il rendimento elettrico e l'asse verticale quello termico.

La soluzione standard, senza CHP

In una prima fase, vengono mostrate centrali elettriche e sistemi di riscaldamento puri e semplici, che offrono solo elettricità o solo calore.



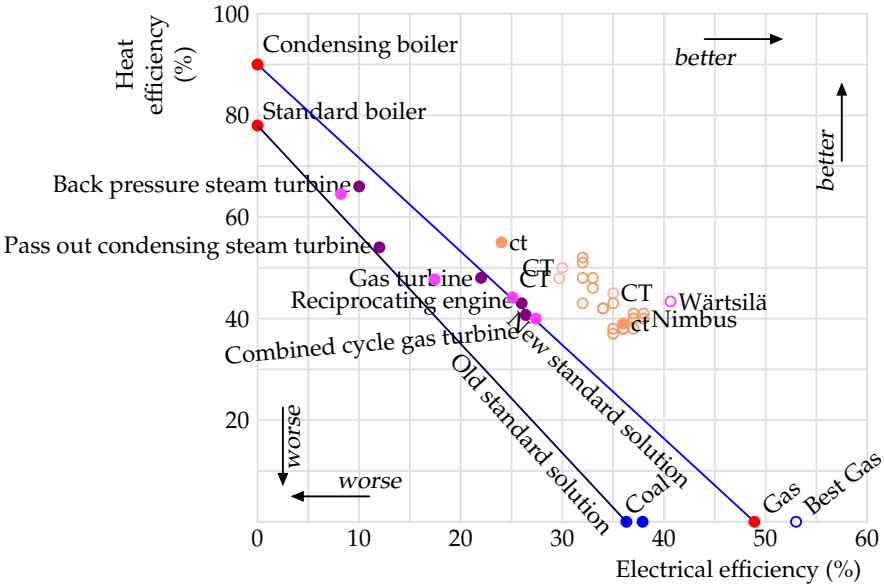
Le caldaie a condensazione (il punto A, in alto a sinistra) sono efficienti al 90%, perché il 10% del calore se ne va su per il camino. Le centrali a gas in Gran Bretagna (il punto B, in basso a destra) attualmente lo sono al 49%, sempre nel trasformare l'energia chimica del gas in elettricità. Se si desidera una qualche combinazione di elettricità e calore dal gas naturale,

la si può ottenere bruciando quantitativi adeguati di gas nella centrale elettrica e nella caldaia. Così la nuova soluzione standard è in grado di presentare qualsiasi efficienza elettrica e termica sulla linea A B fornendo elettricità e calore mediante l'utilizzo di due impianti separati.

Per dare una prospettiva storica, il diagramma mostra anche la vecchia soluzione di riscaldamento standard (una normale caldaia senza condensazione, con un'efficienza del 79%) e il modo standard di produrre elettricità fino a pochi decenni fa (una centrale a carbone, con un rendimento elettrico del 37% o giù di lì).

Cogenerazione

Nel passaggio successivo vengono aggiunti al diagramma i sistemi di cogenerazione. Questi forniscono simultaneamente energia elettrica e termica a partire da quella chimica.



Ciascuno dei punti colorati all'interno (pieni) mostra le prestazioni medie reali dei sistemi di cogenerazione nel Regno Unito, suddivise per tipologia. I punti colorati solo sul bordo (vuoti) e contrassegnati "CT" mostrano le prestazioni dei sistemi ideali di cogenerazione citati dalla Carbon Trust, quelli vuoti contrassegnati "Nimbus" provengono tutti dalle specifiche di prodotto di un unico costruttore [qui identificato con un nome in codice, al contrario di Wärtsilä. (N.d.T.)]. I punti contrassegnati con "ct" rappresentano le prestazioni citate dalla Carbon Trust per due sistemi reali (presso il Freeman Hospital e la Elizabeth House).

La cosa principale da notare in questo diagramma è che i rendimenti elettrici dei sistemi CHP sono significativamente inferiori a quel 49% di efficienza con cui le centrali alimentate a gas forniscono la sola elet-

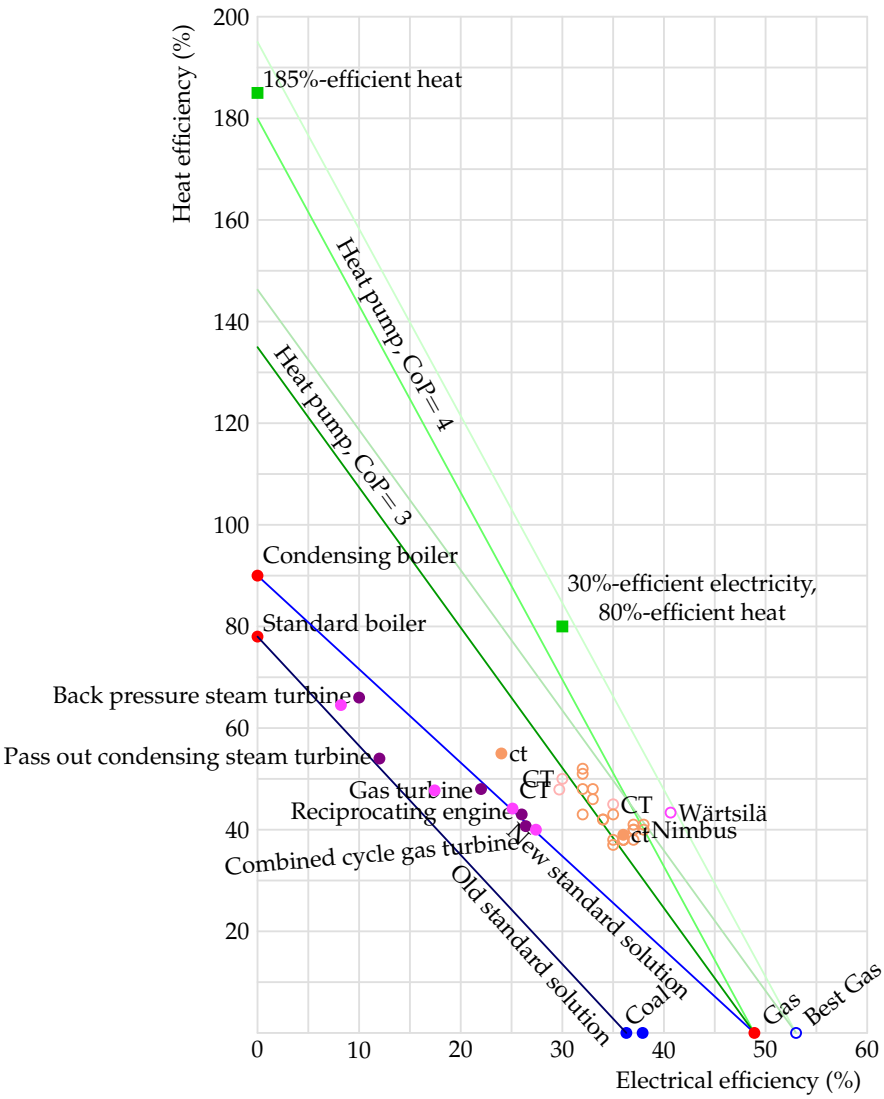
tricità. Pertanto, il calore non è un "sottoprodotto gratis". Aumentare la produzione di calore fa male alla produzione di energia elettrica.

È pratica comune riassumere i due numeri (l'efficienza della produzione di elettricità e di calore) in un'unica cifra forfettaria detta "rendimento totale" – per esempio, la contropressione delle turbine a vapore, offrendo il 10% di elettricità e il 66% di calore dovrebbe essere definita "76%-efficiente", ma ritengo che questa sia una sintesi fuorviante delle prestazioni. Dopo tutto, da una misura come questa, la caldaia a condensazione 90%-efficiente risulta essere "più efficiente" di tutti i sistemi di cogenerazione! Il fatto è che l'energia elettrica è più preziosa del calore.

Molti dei punti inerenti la cogenerazione in questa figura sono superiori al "vecchio modo standard di fare le cose" (che riceveva energia elettrica dal carbone e calore dalle caldaie normali). E i sistemi CHP ideali sono leggermente superiori al "nuovo modo standard di fare le cose" (che riceve energia elettrica dal gas e calore dalle caldaie a condensazione). Ma si deve tenere a mente che questa leggera superiorità viene fornita insieme ad alcuni inconvenienti – un sistema CHP fornisce calore solo ai luoghi ai quali è collegato, mentre le caldaie a condensazione possono essere piantate ovunque ci sia una conduttura del gas; inoltre, rispetto al modo standard di fare le cose i sistemi di cogenerazione non sono particolarmente flessibili nel mix di elettricità e calore che forniscono. Un sistema CHP funziona meglio solo quando fornisce un particolare mix; questa inflessibilità porta ad inefficienze nel momento in cui, per esempio, un eccesso di calore viene prodotto. In una tipica casa, gran parte della domanda di energia elettrica è espressa attraverso picchi relativamente brevi, mantenendo scarsa relazione con la richiesta di riscaldamento. Un ultimo problema riguarda alcuni sistemi micro-CHP e si verifica ogniqualvolta questi hanno elettricità in eccesso da condividere, infatti l'erogazione di questo surplus alla rete può rivelarsi una pessima faccenda.

Infine, vengono aggiunte le pompe di calore, che utilizzano l'energia elettrica della rete per pompare calore negli edifici.

Le linee verdi e ripide mostrano le combinazioni di energia elettrica e calore che si possono ottenere assumendo che le pompe di calore abbiano un coefficiente di prestazione 3 o 4, supponendo che l'elettricità extra per le pompe di calore sia generata da una stazione di media potenza a gas o da una centrale a gas top-della-gamma e tenendo conto di una perdita pari all'8% lungo la rete elettrica nazionale tra la centrale e l'edificio dove le pompe pompano il calore. L'efficienza della migliore centrale a gas è del 53%, assumendo che lavori in modo ottimale. (Immagino che Carbon Trust e Nimbus abbiano fatto un presupposto simile quando forniscono i valori indicati in questo schema per i sistemi CHP). In futuro, le pompe di calore saranno probabilmente in grado di ottenere anche qualcosa di meglio di quanto si è qui assunto. In Giappone, grazie ad una forte legislazione in favore del miglioramento dell'efficienza, le pompe di calore ora disponibili hanno un coefficiente di rendimento di 4.9.



Si noti che le pompe di calore offrono un sistema che può essere "migliore di uno con il 100% di efficienza". Per esempio la "migliore centrale elettrica a gas", alimentando elettricamente le pompe di calore è in grado di fornire una combinazione di energia elettrica 30%-efficiente e calore 80%-efficiente, ossia un "rendimento totale" del 110%. Nessun sistema CHP normale potrebbe mai eguagliare una tale prestazione.

Permettetemi di spiegare tutto questo. Le pompe di calore sono superiori in efficienza alle caldaie a condensazione, anche qualora siano alimentate con l'elettricità proveniente da una centrale a combustione di gas naturale. Se si desidera riscaldare un sacco di edifici utilizzando gas naturale, si potrebbe installare caldaie a condensazione, che sono "90%-efficienti"

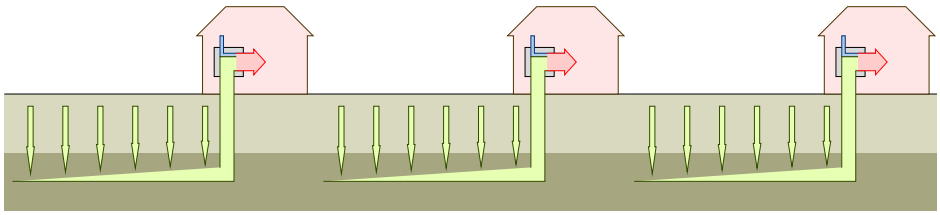


Figura 21.12. Quanto vicino possono essere confezionate insieme le pompe di calore geotermiche?

oppure si può inviare lo stesso gas ad una nuova centrale a gas che eroghi elettricità ed installare pompe di calore alimentate a energia elettrica in tutti quegli edifici; l'efficienza della seconda soluzione potrebbe essere da qualche parte tra il 140% e il 185%. Non è necessario scavare grandi buche nel giardino ed installare il riscaldamento a pavimento per ottenere i benefici delle pompe di calore; le migliori pompe di calore aria-acqua (che richiedono solo un piccolo box esterno, del tutto simile ad un condizionatore d'aria) sono in grado di fornire acqua calda ai normali radiatori con un coefficiente di prestazione superiore a 3. La pompa di calore aria-aria in figura 21.11 (p. 163) eroga direttamente aria calda ad un ufficio.

Si conclude, pertanto, che la cogenerazione, anche se sembra una buona idea, non è probabilmente la modalità migliore attraverso cui riscaldare gli edifici e produrre elettricità con il gas naturale, assunto che possono essere installate negli edifici pompe di calore aria-aria o geotermiche. La soluzione a pompa di calore presenta ulteriori vantaggi che devono essere valorizzati: le pompe di calore possono essere situate in qualsiasi edificio in cui vi sia una fornitura di energia elettrica, possono essere guidate da qualsiasi fonte di energia elettrica, in modo da continuare a lavorare quando il gas si esaurisce o il prezzo del gas sfora il tetto; inoltre, sono flessibili: possono essere attivate e disattivate a seconda delle esigenze di coloro che occupano l'edificio.

Vorrei sottolineare che questo confronto critico non significa che la cogenerazione sia sempre una cattiva idea. Qui si confrontano metodi per il riscaldamento di edifici ordinari, laddove è richiesto solo calore di grado davvero molto basso. La CHP può anche essere utilizzata per fornire calore di grado più elevato agli utenti industriali (a 200 °C, per esempio). In tali ambienti, le pompe di calore difficilmente possono competere così bene, dato che il loro coefficiente di prestazione sarebbe inferiore.

Limiti dello sviluppo (delle pompe di calore)

Poiché la temperatura del terreno, a pochi metri di profondità, rimane pigramente intorno ai 11 °C, che sia estate o inverno, il terreno è teoricamente un posto migliore per una pompa di calore dove afferrare il calore dell'aria, che in pieno inverno può essere 10 o 15 °C più fredda della terra. Pertanto quelli che consigliano la pompa di calore incoraggiano la scelta di una "a sorgente terreno" piuttosto che di una "a sorgente aria", ove

possibile. (Le pompe di calore lavorano in modo meno efficiente laddove si ha una grande differenza di temperatura tra l'interno e l'esterno).

Tuttavia, il terreno non è una fonte illimitata di calore. Il calore deve venire da qualche parte e la terra non è un buon conduttore termico. Se si preleva calore troppo velocemente dal terreno, il terreno diventa freddo come il ghiaccio e il vantaggio della pompa di calore geotermica risulta diminuito.

In Gran Bretagna, lo scopo principale delle pompe di calore consisterebbe nel fornire calore agli edifici in inverno. L'ultima fonte di questo calore è il sole, che infonde calore al terreno per irraggiamento diretto e per conduzione attraverso l'aria. Il tasso al quale il calore viene risucchiato dal terreno deve soddisfare due vincoli: non si deve provocare un eccessivo abbassamento della temperatura del terreno durante l'inverno ed il calore risucchiato in inverno deve essere reintegrato in un qualche modo durante l'estate. Se c'è un qualche rischio che la naturale carica di compensazione del calore in estate non supplisca al calore *naturale* carica di compensazione del calore in estate non supplisca al calore rimosso in inverno, allora la ricostituzione deve essere guidata *attivamente* – per esempio facendo lavorare il sistema in retromarcia nel periodo estivo, ossia immettendo calore nel terreno (e quindi escogitando una climatizzazione di ricarica).

	area per persona (m^2)
Bangalore	37
Manhattan	39
Parigi	40
Chelsea	66
Tokyo	72
Mosca	97
Taipei	104
L'Aia	152
San Francisco	156
Singapore	156
Cambridge MA	164
Sydney	174
Portsmouth	213

Tabella 21.13. Alcune aree urbane per persona.

Mettiamo alcuni numeri in questa discussione. Quanto è grande il pezzo di terreno di cui ha bisogno una pompa di calore geotermica? Si supponga di avere un quartiere con una bella densità di popolazione – vale a dire 6200 abitanti per km^2 (160 m^2 a persona), la densità di un tipico sobborgo britannico. È possibile per *tutti* utilizzare pompe di calore geotermiche, senza l'impiego di una ricarica attiva d'estate? Un calcolo nel Capitolo E (p. 338) fornisce un tentativo di risposta *negativa*: qualora si volesse che tutti nel quartiere fossero in grado di tirare da terra un flusso di calore di circa 48 kWh/gg per persona (la mia stima della nostra tipica domanda di calore invernale), si finirebbe con il congelare il terreno in inverno. Evitare un raffreddamento irragionevole del terreno richiede che il tasso di suzione sia inferiore a 12 kWh/gg per persona. Pertanto, se si passa a pompe di calore geotermiche, si deve pianificare di includere una sostanziale "discarica-estiva" di calore nel progetto, in modo da stipare il terreno con il calore da usarsi in inverno. Questa "discarica-estiva" di calore potrebbe utilizzare il calore dato dal condizionamento dell'aria oppure quello proveniente da pannelli solari montati sul tetto per scaldare l'acqua. (Il calore del sole estivo è immagazzinato nel terreno per il successivo utilizzo in inverno dalla Drake Landing Solar Community in Canada [`www.dlsc.ca`]). Altrimenti, ci si deve aspettare che sia necessario impiegare per tale scopo anche alcune pompe di calore aria-aria, in questo modo si sarà in grado di ottenere tutto il calore che si desidera – fino a quando si avrà energia elettrica per pomparlo. Nel Regno Unito, le temperature dell'aria non si spingono molto al di sotto dello zero, quindi le preoccupazioni circa lo scarso rendimento invernale delle pompe aria-aria, eventualmen-

te valide in Nord America e Scandinavia, probabilmente non valgono in Gran Bretagna.

La mia conclusione: possiamo ridurre l'energia che consumiamo per il riscaldamento? Sì. Possiamo fare a meno dei combustibili fossili, allo stesso tempo? Sì. Senza dimenticare le cose più semplici e facili – isolare gli edifici e non fare i bricconi con il termostato – dovremmo sostituire tutte le nostre stufe a combustibili fossili con pompe di calore ad alimentazione elettrica; così possiamo ridurre l'energia richiesta del 25% rispetto ai livelli odierni. Naturalmente questo piano per l'elettrificazione richiederebbe più energia elettrica. Ma anche se l'elettricità in eccesso provenisse da centrali elettriche a gas, questo sarebbe ancora un modo molto migliore di ottenere il riscaldamento rispetto a quello che si fa oggi, semplicemente dando fuoco al gas. Le pompe di calore sono a prova di futuro, permettendoci di riscaldare gli edifici in modo efficiente con energia elettrica da qualsiasi fonte.

I Signor-NO obiettano che il coefficiente di prestazione delle pompe di calore aria-aria è uno schifo – solo 2 o 3. Ma le loro informazioni non sono aggiornate. Se si è attenti a comprare pompe di calore top-della-gamma, si è in grado di fare molto meglio. Il Governo giapponese ha legiferato in favore di un decennio di efficientamento che ha notevolmente migliorato le prestazioni dei condizionatori d'aria; grazie a questa guida, ora ci sono pompe di calore ad aria con un coefficiente di rendimento pari a 4.9, in grado di produrre sia acqua che aria calda.

Un'altra obiezione alle pompe di calore è "oh, non possiamo approvare il fatto che le persone montino caloriferi ad aria così efficienti, perché li potrebbero utilizzare per l'aria condizionata in estate". Andiamo – odio l'abuso gratuito di aria condizionata tanto quanto chiunque, ma queste pompe di calore sono quattro volte più efficienti rispetto a qualsiasi altro metodo di riscaldamento invernale! Mostratemi una scelta migliore. Pellet di legno? Certo, qualcuno che vada a rovistare nei rifiuti per cercare la legna [letteralmente: gli spazzini della legna. (N.d.T.)] può bruciarla. Ma non c'è abbastanza legna per tutti. Per gli abitanti della foresta, c'è la legna. Per tutti gli altri, ci sono le pompe di calore.

Note ed approfondimenti

p.

157 *L'isolamento del sotto-tetto e delle cavità riduce la perdita di calore in una tipica vecchia casa di circa un quarto.* Eden and Bending (1985).

159 *Nel 1970 la temperatura media interna nelle case britanniche era di 13 °C!* Fonte: Dept. of Trade and Industry (2002a, para 3.11)

161 *La Gran Bretagna è piuttosto indietro per quanto riguarda teleriscaldamento e cogenerazione.* Il calore rigettato dalle centrali elettriche nel Regno Unito avrebbe potuto soddisfare le esigenze di riscaldamento di tutto il Paese (Wood, 1985).

In Danimarca, nel 1985, i sistemi di teleriscaldamento alimentavano il 42% del riscaldamento degli ambienti, con il calore trasmesso a 20 km o più per mezzo di acqua calda pressurizzata. In Germania Ovest nel 1985, 4 milioni di abitazioni ricevevano 7 kW per abitazione dal teleriscaldamento. Due terzi del calore fornito proveniva da centrali elettriche. A Vasteras, Svezia, nel 1985, il 98% del calore della città, era fornito dalle centrali elettriche.

163 *Le pompe di calore sono circa quattro volte più efficienti di una stufa elettrica standard.* Si veda `www.gshp.org.uk`.
Alcune pompe di calore disponibili nel Regno Unito già hanno un coefficiente di prestazione più grande di 4.0 [`yok2nw`]. Esiste anzi una sovvenzione del Governo per le pompe di calore acqua-aria e acqua-acqua che si applica solo alle pompe con un coefficiente di prestazione migliore di 4.4 [`2dtx8z`].
Le pompe di calore geotermiche disponibili in commercio hanno un coefficiente di rendimento di 5.4 per il raffreddamento e 4.9 per il riscaldamento [`2fd8ar`].

170 *Pompe di calore ad aria con un coefficiente di rendimento di 4.9...* Secondo l'HPTCJ (2007), pompe di calore con un coefficiente di rendimento 6.6 sono disponibili in Giappone dal 2006. Le prestazioni delle pompe di calore in Giappone sono migliorate passando da un coefficiente 3 al 6 in un decennio grazie a regolamenti governativi. L'HPTCJ (2007) descrive una pompa di calore aria-acqua che funge da scalda-acqua, chiamata Eco Cute, con un coefficiente di rendimento di 4.9. La Eco Cute è arrivata sul mercato nel 2001. `www.ecosystem-japan.com`.

Per saperne di più sulle pompe di calore: European Heat Pump Network
`ehpn.fiz-karlsruhe.de/en/`,
`www.kensaengineering.com`,
`www.heatking.co.uk`,
`www.iceenergy.co.uk`.

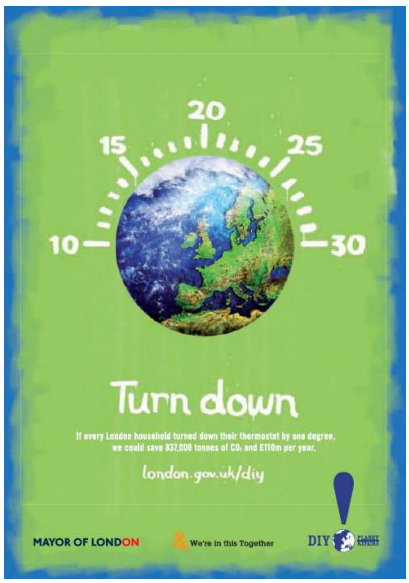


Figura 21.14. Annuncio del Sindaco di Londra per la campagna "Riparazioni FAI-DA-TE per il Pianeta" del 2007. Il testo recita: "**Abbassalo**. Se ogni famiglia di Londra abbassasse il proprio termostato di un grado, potremmo risparmiare 837 000 tonnellate di CO_2 e £110 mln all'anno." [`london.gov.uk/diy`]
In termini di risparmio a persona diventano 0.12 t CO_2 all'anno; il che significa circa 1% del totale a persona (11 t). Questo *sì* che è un buon consiglio. Ben fatto, Ken!

22 Uso efficiente dell'elettricità

Possiamo tagliare i consumi dell'elettricità? Sì, spegnere i nostri aggeggi, quando non sono in uso, è un modo semplice di fare la differenza. Anche usare lampadine a basso consumo è di aiuto per risparmiare energia.

Abbiamo già esaminato gli apparecchi elettrici ed elettronici nel Capitolo 11. Alcuni di essi sono insignificanti ma altri ciucciano corrente elettrica in maniera sorprendente. La stampante nel mio ufficio, messa lì senza fare nulla, si beve 17 W – quasi 0.5 kWh al giorno! Un mio amico ha comprato una lampada all'IKEA. Il suo orribile trasformatore (figura 22.1) ciuccia 10 W (0.25 kWh al giorno) che la lampada sia accesa o no. Se poi si aggiungono un paio di stereo, il lettore DVD, il modem e gli apparecchi wireless, vedrete che si può risparmiare la metà dei consumi di corrente di casa vostra.

Figura 22.1. Un orribile trasformatore dell' IKEA – il trasformatore usa quasi 10 W anche quando la lampada è spenta!

Secondo l'Agenzia Internazionale dell'Energia il consumo di corrente dovuto allo standby si attesta grossomodo all'8% della richiesta di energia per le utenze residenziali. Nel Regno Unito e in Francia, il consumo medio per lo standby si aggira sui 0.75 kWh/gg per abitazione. Il problema non è lo standby di per se stesso – è la maniera scadente in cui viene implementato. È perfettamente possibile costruire sistemi che consumino meno di 0.01 W durante lo standby; ma i costruttori, per risparmiare un penny in costi di fabbricazione, accollano sui consumatori costi per svariate sterline.

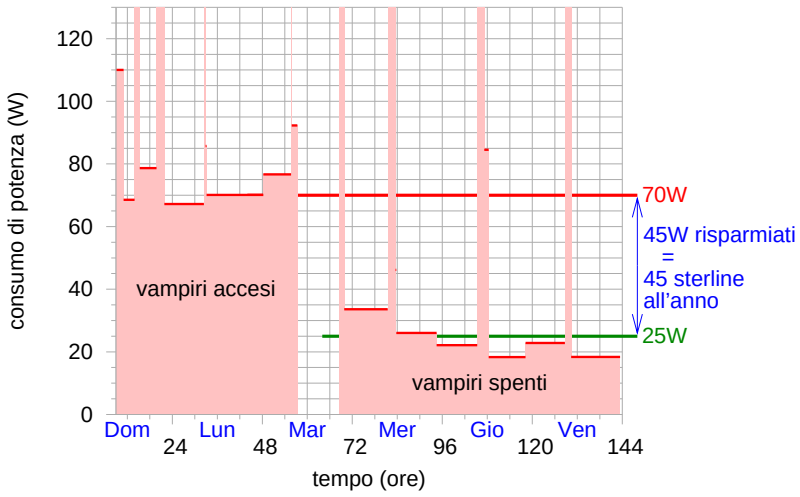


Figura 22.2. L'efficienza dello spegnere. Ho misurato il risparmio dato dallo spegnere i vampiri succhia elettricità in una settimana durante la quale sono stato via per lavoro gran parte del giorno tutti i giorni, per cui sia di giorno che di notte questi erano privati della loro utilità ed inattivi, a parte il frigorifero. I brevi picchi di consumo sono stati causati dal microonde, dal tostapane, dalla lavatrice o dall'aspirapolvere. Il martedì ho spento la maggior parte dei miei vampiri: due stereo, un lettore dvd, un modem, un router wi-fi e una segreteria telefonica. La linea rossa mostra la tendenza del consumo "nessuno-in-casa" prima del cambiamento, la verde quella dopo il cambiamento. Il consumo è precipitato di 45 W, ossia 1.1 kWh al giorno.

Un esperimento ammazza vampiri

La Figura 22.2 mostra un esperimento che ho fatto a casa. Prima, per due giorni, ho misurato il consumo di energia elettrica quando ero fuori o dormivo. Poi, tenendo spenti tutti i dispositivi che di solito lascio accesi, ho continuato le misure ancora per altri tre giorni. Ho notato che avevo risparmiato 45 W – il che significa £45 all'anno, se l'elettricità ha un costo unitario di 11 pence.

Da quando ho cominciato a fare attenzione alle letture del mio contatore, il mio consumo di elettricità si è dimezzato (figura 22.3). Ho consolidato il risparmio prendendo l'abitudine di leggere il contatore ogni settimana, per essere certo che quei vampiri succhia-energia siano banditi. Se questo trucco potesse essere ripetuto in tutte le case ed uffici, potremmo ovviamente realizzare risparmi sostanziali. Un bel gruppetto qui da noi a Cambridge sta mettendo su un sito internet votato a far sì che la lettura regolare dei contatori sia divertente ed informativa. Il sito, `ReadYourMeter.org`, ha lo scopo di aiutare la gente ad eseguire esperimenti come il mio, dare un senso ai numeri risultanti ed ottenere quella sensazione di calore diffuso data dal consumare meno.

Io spero davvero che questa sorta di attività di misurazione intelligente faccia la differenza. Nel modello stilizzato di Gran Bretagna previsto per il 2050 ho, tuttavia, assunto che tutti i risparmi energetici vengano cancellati dal miracolo della crescita. La Crescita è uno dei princìpi della nostra società: la gente sarà più ricca e potrà comprare più aggeggi. La domanda di videogiochi sempre-più-superlativi forza la crescita del consumo di corrente dei computer. I computer dell'ultimo decennio erano pensati in modo più che fantastico, ora sono inutili e devono essere rimpiazzati da computer più veloci e performanti.

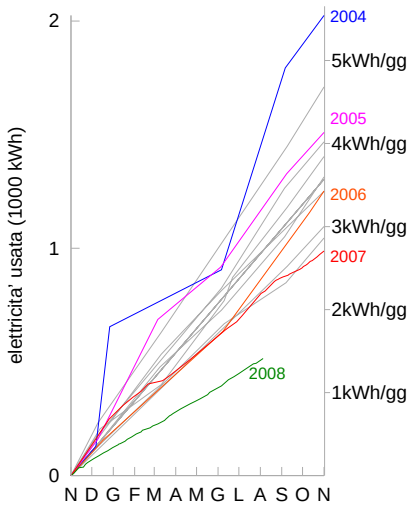


Figura 22.3. Il mio consumo di elettricità domestico cumulativo, in kWh, ogni anno dal 1993 al 2008. Le linee grigie mostrano gli anni dal 1993 al 2003 (non le ho contrassegnate col loro anno per evitare confusione). Le linee colorate mostrano gli anni dal 2004 in poi. La scala sulla destra mostra la media del consumo di energia in kWh al giorno. L'esperimento dei vampiri ha avuto luogo il 2 ottobre 2007. La combinazione di messa-al-bando-dei-vampiri ed installazione di lampade-a-risparmio-energetico ha ridotto il mio consumo di elettricità da 4 kWh/gg a 2 kWh/gg.

Note ed approfondimenti

p.

172 *Il consumo di energia per lo stand-by si attesta grossomodo all'8% della richiesta di energia per le utenze residenziali.* Fonte: International Energy Agency (2001). Per ulteriori letture sulle politiche inerenti i consumi in standby, si visiti: `www.iea.org/textbase/subjectqueries/standby.asp`.

23 Combustibili fossili sostenibili?

È un'ineluttabile realtà che i combustibili fossili continuino ad essere una parte importante del mix energetico per i decenni a venire.

Portavoce del Governo del Regno Unito, Aprile 2008

La nostra attuale condizione felice e progressista è un evento di durata limitata.

William Stanley Jevons, 1865

Figura 23.1. Carbone in consegna alla centrale elettrica di Kingsnorth (capacità 1940 MW) nel 2005. Foto di Ian Boyle `www.simplonpc.co.uk`.

Abbiamo esplorato negli ultimi tre capitoli i maggiori cambiamenti tecnologici e dello stile di vita in grado di ridurre i consumi energetici. Abbiamo visto che possiamo dimezzare i consumi sui trasporti (e de-fossilizzarli), passando ai veicoli elettrici. Abbiamo visto che possiamo ulteriormente restringere il consumo di energia per il riscaldamento (e de-fossilizzarlo), isolando meglio gli edifici ed usando pompe di calore elettriche invece che i combustibili fossili. Quindi sì, possiamo ridurre i consumi. Tuttavia, abbinare questi consumi seppur ridotti con la sola elettricità prodotta dalle nostre fonti rinnovabili in Gran Bretagna appare ancora impresa assai ardua (figura 18.7, p. 121). È tempo di parlare dell'opzione di produzione elettrica da fonti non rinnovabili.

Prendiamo le riserve note di combustibili fossili, in prevalenza carbone: 1600 Gt di carbone. Suddividiamole equamente tra sei miliardi di persone e bruciamole "in modo sostenibile". Cosa intendiamo quando parliamo di usare una risorsa finita "in modo sostenibile"? Ecco una mia definizione arbitraria, che è poi quella che userò: il "flusso di cassa" è "sostenibile" se le risorse durano 1000 anni. Una tonnellata di carbone fornisce 8000 kWh di energia chimica, pertanto 1600 Gt di carbone suddivise tra 6 miliardi di persone per 1000 anni significa una potenza di 6 kWh al giorno per persona. Una centrale a carbone standard trasforma la potenza chimica del carbone in elettricità con un'efficienza del 37% – il che significa 2.2 kWh(e) al giorno per persona. Tuttavia, avendo a cuore il clima, presumibilmente non utilizzeremmo una centrale standard. Preferiremmo, piuttosto, andare a "carbone pulito", ossia quello altrimenti conosciuto come "carbone con cattura e sequestro del carbonio" – una tecnologia ancora scarsamente impiegata, che succhia quasi tutta l'anidride carbonica in uscita dalla ciminiera e la caccia in una foro giù per terra. Ripulire le emissioni delle centrali in questa maniera ha alti costi energetici – ridurrebbe l'elettricità fornita del 25% circa. Pertanto, un uso "sostenibile" delle riserve note di carbone fossile fornirebbe soltanto 1.6 kWh(e) al giorno per persona.

Carbone: **6 kWh/d**

Figura 23.2. "Combustibili fossili sostenibili".

Possiamo paragonare questo tasso "sostenibile" di combustione del carbone – 1.6 Gt all'anno – con l'attuale tasso di consumo del carbone a livello globale: 6.3 Gt all'anno, in crescita.

E per quanto riguarda il solo Regno Unito? Si stima che in Gran Bretagna siano rimaste 7 Gt di carbone fossile. OK, dividendo 7 Gt tra 60 milioni di persone, si hanno 100 tonnellate a persona. Volendo una soluzione per-1000-anni, questo corrisponde a 2.5 kWh al giorno per persona. Con un approccio sostenibile al carbone nel Regno Unito, una centrale elettrica che implementasse la cattura ed il sequestro del carbonio renderebbe 0.7 kWh(e) al giorno per persona.

La nostra conclusione è chiara:

Il carbone pulito è solo un tappabuchi.

Figura 23.3. Un caterpillar che pascola su delle vecchie foglie. Foto di Peter Gunn.

Se sviluppiamo la tecnologia del "carbone pulito" allo scopo di ridurre le emissioni dei gas ad effetto-serra, dobbiamo stare attenti, mentre ci diamo delle pacche sulle spalle, a fare i conti onestamente. Il processo di combustione del carbone non rilascia gas-serra solo in centrale, ma anche in miniera. L'estrazione del carbone tende a sprigionare metano, monossido di carbonio ed anidride carbonica, direttamente dalle vene di carbone non appena vengono esposte e successivamente dagli scisti e dalle rocce sedimentarie di tipo argilloso che vengono scartate. Per una normale centrale a carbone, le emissioni in miniera aumentano l'impronta dei gas-serra di circa il 2%; quindi, forse anche per una centrale a carbone "pulito" queste emissioni un qualche impatto sui conti ce l'hanno. Esiste un problema di contabilità del tutto simile anche con il gas naturale: se, per dire, il 5% del gas naturale fuoriuscisse dai condotti lungo il tragitto dal buco di perforazione alla centrale elettrica, allora l'inquinamento da metano per via accidentale sarebbe equivalente (in termini di effetto serra) ad un incremento del 40% del biossido di carbonio rilasciato in centrale.

Le nuove tecnologie del carbone

La società `directcarbon.com` con base a Stanford sta sviluppando la *Cella a Combustibile a Carbone Diretto*, che converte il combustibile e l'aria direttamente in elettricità e CO_2, senza l'utilizzo di acqua o turbine a vapore. Costoro sostengono che in tal modo si abbia generazione di elettricità dal carbone due volte più efficiente che nelle centrali standard.

Quand'è che chiuderemo i battenti?

L'economista Jevons fece un semplice calcolo nel 1865. La gente discuteva su quanto a lungo il carbone britannico sarebbe durato. Si propendeva a rispondere a questa domanda dividendo il carbone stimato rimanente per il tasso di consumo, ottenendo delle risposte del tipo "1000 anni". Ma, diceva Jevons, i consumi *non* sono costanti. Sono andati raddoppiando ogni 20 anni e il "progresso" dovrebbe continuare di questo passo. Pertanto, l'operazione "riserve diviso tasso di consumo" dà la risposta sbagliata.

Viceversa, Jevons estrapolò la crescita esponenziale dei consumi, calcolando il momento in cui l'ammontare del consumo totale [di carbone. (N.d.T.)] avrebbe ecceduto le giacenze stimate. Questo corrispondeva ad una durata molto più breve. Jevons non stava assumendo che il consumo dovesse davvero continuare a crescere allo stesso modo; al contrario, era arrivato a puntualizzare che la crescita non era sostenibile. Il suo calcolo stimò, per i lettori britannici, l'inevitabile limite della loro crescita e il poco tempo rimanente prima che questi limiti diventassero evidenti. Jevons fece l'audace previsione che la fine del "progresso" britannico sarebbe arrivato entro 100 anni dal 1865. Aveva ragione. Il picco della produzione del carbone britannico si ebbe nel 1910 e nel 1965 la gran Bretagna non era più una super-potenza a livello mondiale.

Ripetiamo il suo calcolo per il mondo intero. Nel 2006 il consumo di carbone era di 6.3 Gt all'anno. Confrontando questo con le riserve ammontanti a 1600 Gt di carbone, spesso la gente dice: "è rimasto carbone per 250 anni". Tuttavia, assumendo che gli "affari come al solito" implichino una crescita dei consumi, si ottiene una risposta differente. Se il consumo di carbone dovesse continuare a crescere con un tasso del 2% all'anno (il che sarebbe in linea con i dati dal 1930 al 2000), allora tutto il carbone verrebbe esaurito entro il 2096. Se il tasso di crescita fosse, invece, del 3.4% all'annno (quello dell'ultima decade), "chiuderemmo i battenti" prima del 2072. Non 250 anni, bensì 60!

Se Jevons fosse qui oggi, sono sicuro che pronosticherebbe con fermezza che, a meno che non si cambi rotta, nel 2050 o nel 2060 avrà fine la nostra felice condizione di continua crescita dei consumi.

Note ed approfondimenti

p.

174 *1000 anni – la mia definizione arbitraria di "sostenibile".* Esiste un precedente a questo tipo di scelta: Hansen et al. (2007) uguagliano "più di 500 anni" a "per sempre".

– *1 tonnellata di carbone equivale a 29.3 GJ = 8000 kWh* di energia chimica. Questo non include i costi energetici di estrazione, trasporto e sequestro del carbonio.

– *Cattura e sequestro del carbonio* (CCS). Esistono diverse tecnologie CCS. Succhiare la CO_2 dai gas di scarico è una; altre gassificano il carbone e separano la CO_2 prima della combustione. Si veda Metz et al. (2005). Il primo prototipo di impianto a carbone CCS è stato inaugurato il 9 Settembre 2008 dalla società svedese Vattenfall [5kpjk8].

175 *Carbone fossile nel Regno Unito*. Nel dicembre 2005, riserve e risorse presso le *miniere esistenti* furono stimate ammontare a 350 milioni di tonnellate. Nel novembre 2005, le riserve a cielo aperto potenziali furono stimate in 620 milioni di tonnellate; la potenziale gassificazione del carbone sotterraneo fu stimata essere al massimo pari a 7 miliardi di tonnellate. [yebuk8]

– *L'estrazione del carbone tende a sprigionare gas ad effetto-serra*. Per informazioni sul rilascio di metano dall'estrazione del carbone si veda www.epa.gov/cmop/, Jackson and Kershaw (1996), Thakur et al. (1996). Le emissioni globali di metano dall'estrazione del carbone ammontano a circa 400 Mt CO_2e all'anno. Questo corrisponde grosso modo al 2% delle emissioni di gas-serra provenienti dalla combustione del carbone.
Il contenuto medio di metano nei giacimenti di carbone della Gran Bretagna è di 4.7 m^3 per tonnellata di carbone (Jackson and Kershaw, 1996); questo metano, se rilasciato in atmosfera, ha un potenziale di riscaldamento globale pari al 5% di quello della CO_2 ottenuta dalla combustione del carbone.

175 *Se si hanno perdite di gas naturale per un 5%, ciò equivale ad un incremento del 40% in termini di anidride carbonica*. L'inquinamento accidentale da metano ha un effetto sul riscaldamento globale circa otto volte maggiore dell'inquinamento da CO_2 prodotto dalla combustione del metano stesso; otto volte, non le classiche "23 volte", poiché "23 volte" è il quoziente di riscaldamento che viene dal rapporto tra *masse* uguali di metano e CO_2. Ogni tonnellata di CH_4 diventa 2.75 tonnellate di CO_2 se bruciata; se proviene da perdite e fuoriuscite, equivale a 23 tonnellate di CO_2. E 23/2.75 fa 8.4.

Per ulteriori approfondimenti: World Energy Council [yhxf8b]

Per saperne di più sulla gassificazione sotterranea del carbone: [e2m9n]

24 Nucleare?

Abbiamo commesso l'errore di considerare alla stessa stregua energia ed armamenti nucleari, come se tutte le cose nucleari fossero malvagie. Penso che sia un errore grande tanto quanto prendere medicina ed armi nucleari e farne un unico fascio.

Patrick Moore,
ex Direttore di Greenpeace International

L'energia nucleare è disponibile in due versioni. La *fissione* nucleare è quella che sappiamo come utilizzare nelle centrali elettriche; essa impiega come combustibile l'uranio, un elemento particolarmente pesante. La *fusione* nucleare è quella che non sappiamo ancora come implementare nelle centrali elettriche; essa utilizzerebbe come combustibile elementi leggeri, soprattutto idrogeno. Le reazioni di fissione dividono i nuclei pesanti in nuclei di medie dimensioni, liberando energia. Le reazioni di fusione fondono nuclei leggeri in nuclei di medie dimensioni, liberando energia.

Entrambe le forme di energia nucleare, fissione e fusione, hanno una proprietà importante: l'energia nucleare disponibile per atomo è di circa un milione di volte più grande dell'energia chimica per ogni atomo di combustibili ordinari. Ciò significa che la quantità di combustibile e rifiuti che deve essere trattata in un reattore nucleare può essere fino a un milione di volte più piccola della quantità di combustibile e rifiuti in una centrale a combustibili fossili equivalente.

Proviamo a personalizzare queste idee. La massa dei combustibili fossili consumati dalla "persona media britannica" è pari a circa 16 kg al giorno (4 kg di carbone, 4 kg di petrolio e 8 kg di gas). Ciò significa che ogni singolo giorno, una quantità di combustibili fossili con lo stesso peso di 16 litri di latte viene estratta da un buco nel terreno, trasportata, trasformata e bruciata da qualche parte per vostro conto. L'abitudine ai combustibili fossili del Britannico medio genera 11 tonnellate all'anno di scorie in termini di biossido di carbonio, vale a dire 30 kg al giorno. Nel capitolo precedente abbiamo sollevato l'idea di catturare tali scorie, comprimendole in forma solida o liquida e trasportandole da qualche parte per lo smaltimento. Immaginate se ogni persona fosse incaricata della cattura e del trattamento di tutte le proprie scorie di biossido di carbonio. 30 kg al giorno di anidride carbonica significano uno zaino bello pieno ogni giorno – lo stesso peso di 30 bottiglie da un litro di latte!

Al contrario, la quantità di uranio naturale richiesta per fornire la stessa quantità di energia di 16 kg di combustibili fossili, in un reattore a fissione standard è di 2 grammi e gli scarti derivanti pesano un quarto di grammo. (A proposito, questi 2 g di uranio non corrispondono ad un milionesimo di 16 kg al giorno, perché i reattori di oggi "bruciano" meno dell'1% dell'uranio). Per offrire 2 grammi di uranio al giorno, è probabile che i mi-

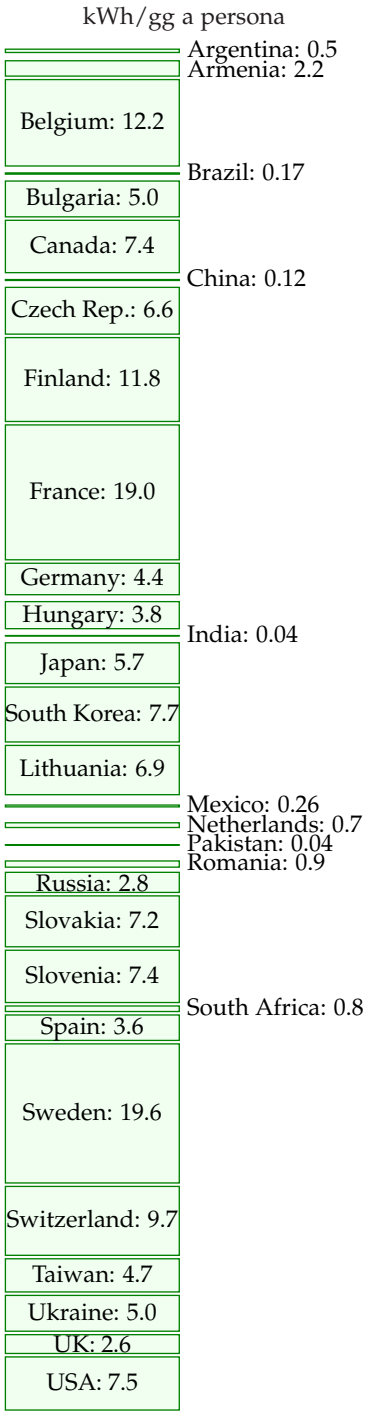


Figura 24.1. Energia elettrica prodotta pro capite da fissione nucleare nel 2007, in kWh al giorno per persona, in ciascuno dei Paesi dotati di centrali nucleari.

natori nella miniera di uranio abbiano dovuto aver a che fare con 200 g di minerale al giorno.

Pertanto, i flussi di materiale che scorrono dentro e fuori i reattori nucleari sono piccoli, rispetto ai flussi dei combustibili fossili. "Piccolo è bello", ma il fatto che il flusso di rifiuti nucleari sia piccolo non vuol dire che non sia un problema, è solo un problema "meravigliosamente piccolo".

Potenza "sostenibile" fornita tramite fissione nucleare

La Figura 24.1 mostra Paese per Paese la quantità di energia elettrica generata da potenza nucleare a livello globale nel 2007.

Il nucleare può essere "sostenibile"? Lasciando da parte per un momento le solite questioni inerenti sicurezza e smaltimento dei rifiuti, una domanda chiave è se l'umanità possa vivere per generazioni a fissione. Quanto grandi sono le ampie riserve mondiali di uranio e degli altri combustibili fissili? Abbiamo uranio a sufficienza solo per pochi decenni o ne abbiamo per millenni?

Per fare una stima della potenza "sostenibile" offerta dall'uranio, ho preso tutto l'uranio recuperabile nel terreno e nell'acqua di mare, l'ho diviso equamente tra 6 miliardi di esseri umani e mi sono chiesto: "quanto velocemente possiamo utilizzare tutto questo, se deve durare 1000 anni?"

Quasi tutto l'uranio recuperabile è negli oceani, non nella terra: l'acqua di mare contiene 3.3 mg di uranio per m^3, di uranio per 4.5 miliardi di tonnellate in tutto il mondo. Ho definito l'uranio nel mare "recuperabile", ma sono stato un po' impreciso – la maggior parte delle acque oceaniche sono piuttosto inaccessibili; inoltre, il nastro trasportatore dell'oceano fa un giro completo solo una volta ogni 1000 anni circa, mentre nessuno ha ancora dimostrato su scala industriale l'estrazione dell'uranio dall'acqua di mare. Pertanto, faremo stime separate per i due casi: nella prima usando solo l'uranio estratto in miniera, nella seconda anche l'uranio negli oceani.

Il minerale di uranio presente nel suolo ed estraibile a prezzi inferiori ai $130 al kg è circa un millesimo del totale. Con prezzi al di sopra di $130 al kg i depositi di fosfati che contengono uranio a bassa concentrazione diventerebbero economici per l'estrazione. Il recupero di uranio da fosfati è perfettamente possibile ed è stato fatto in America e Belgio prima del 1998. Per la stima dell'uranio estratto in miniera, aggiungerò sia il minerale convenzionale che i fosfati, ottenendo una risorsa totale di 27 milioni di tonnellate di uranio (tabella 24.2).

Prenderemo in considerazione due modi di usare l'uranio in un reattore: (a) il *metodo una-volta-e-basta* [ciclo aperto. - (N.d.T.)], ampiamente utilizzato, che ottiene energia principalmente dal ^{235}U (costituente solo lo 0.7% dell'uranio naturale) e che scarta il ^{238}U rimanente; (b) i *reattori autofertilizzanti veloci*, che sono più costosi da costruire e che convertendo il ^{238}U in plutonio-239, che è fissile, ottengono circa 60 volte più energia dall'uranio.

	milioni di tonnellate uranio
Australia	1.14
Kazakhstan	0.82
Canada	0.44
USA	0.34
Sud Africa	0.34
Namibia	0.28
Brasile	0.28
Federazione Russa	0.17
Uzbekistan	0.12
Totale Mondo (riserve convenzionali nel terreno)	4.7
Depositi di fosfato	22
Acqua di mare	4 500

Tabella 24.2. Risorse di uranio ad oggi note e recuperabili. La parte superiore della tabella mostra le "risorse ragionevolmente assicurate" e le "risorse dedotte", al costo di meno di $130 per kg di uranio, al primo gennaio 2005. Queste sono le risorse stimate in aree in cui ha avuto luogo l'esplorazione. Ci sono anche 1.3 milioni di tonnellate di uranio depleto di riserva, accumulate in giro, quale sottoprodotto di attività precedenti sull'uranio [i.e. processamento e riprocessamento. (N.d.T.)].

Reattori a ciclo aperto, utilizzando l'uranio presente nel suolo

Una centrale nucleare a ciclo aperto da **un-gigawatt** utilizza **162 t all'anno di uranio**. Pertanto le risorse note di uranio estraibile, condivise tra i 6 miliardi di persone, durerebbero 1000 anni, se si producesse nucleare ad un tasso di 0.55 kWh al giorno per persona. Questo tasso sostenibile corrisponde a quanto fornito da sole 136 centrali nucleari, ossia alla metà della produzione odierna di energia nucleare. È assai probabile che questa sia una sottostima del potenziale dell'uranio in quanto, fintantoché non si ha carenza di uranio, non vi è alcun incentivo all'esplorazione e dagli anni '80 di esplorazione se ne è intrapresa poca; quindi, un maggior quantitativo di uranio estraibile verrà, forse, scoperto. In effetti, uno studio pubblicato nel 1980 stimava la risorsa uranio a basso grado più di 1000 volte superiore ai 27 milioni di tonnellate che abbiamo appena assunto.

L'attuale sistema di utilizzo a ciclo aperto dell'uranio estratto in miniera può essere sostenibile? Difficile a dirsi, data l'incertezza circa il risultato di future esplorazioni. Certamente al tasso di consumo di oggi, i reattori a ciclo aperto potrebbero andare avanti per centinaia di anni. Ma qualora si volesse aumentare la potenza nucleare di 40 volte su scala mondiale, in modo da sbarazzarsi dei combustibili fossili e permettere al contempo una crescita dello standard di vita, potrebbe divenire fonte di preoccupazione il fatto che i reattori a ciclo aperto non sono una tecnologia sostenibile.

Figura 24.3. Operai spingono barre di uranio nel reattore X-10 moderato a grafite.

Figura 24.4. Centrale nucleare di Three Mile Island.

Reattori autofertilizzanti veloci, utilizzando l'uranio presente nel suolo

L'uranio può essere usato in reattori autofertilizzanti veloci 60 volte più efficienti, che "bruciano" tutto l'uranio – sia il ^{238}U che il ^{235}U (al contrario dei reattori a ciclo aperto, che bruciano principalmente ^{235}U). Se non si butta via il combustibile esausto che viene sputato fuori dai reattori a ciclo aperto, anche questa fonte di uranio potrebbe venire impiegata, sicché l'uranio immesso nei reattori a ciclo aperto non deve necessariamente essere sprecato. Qualora si utilizzasse tutto l'uranio estraibile (più le riserve di uranio depleto) [termine gergale, equivalente di "impoverito", risultato di scarto del processo di arricchimento del combustibile o del riprocessamento/riciclo del medesimo – in questo caso la miscela isotopica contiene anche ^{236}U (0.0003%) –, da non confondersi appunto con l'uranio "esausto", risultato di "scarto" del processo di fissione. (N.d.T.)] in reattori autofertilizzanti veloci 60 volte più efficienti, la potenza disponibile ammonterebbe a 33 kWh al giorno per persona. L'atteggiamento verso i reattori veloci autofertilizzanti va da "si tratta di una tecnologia sperimentale, pericolosa e già fallita, di cui uno non dovrebbe neanche parlare" a "possiamo e dobbiamo iniziare a costruire reattori autofertilizzanti subito". Io non ho le competenze per commentare i rischi della tecnologia autofertilizzante e non voglio mescolare affermazioni etiche con asserzioni fattuali. Il mio

Figura 24.5. Il Nuclear Power Development Establishment di Dounreay, il cui scopo principale era lo sviluppo della tecnologia dei reattori veloci autofertilizzanti. Foto di John Mullen.

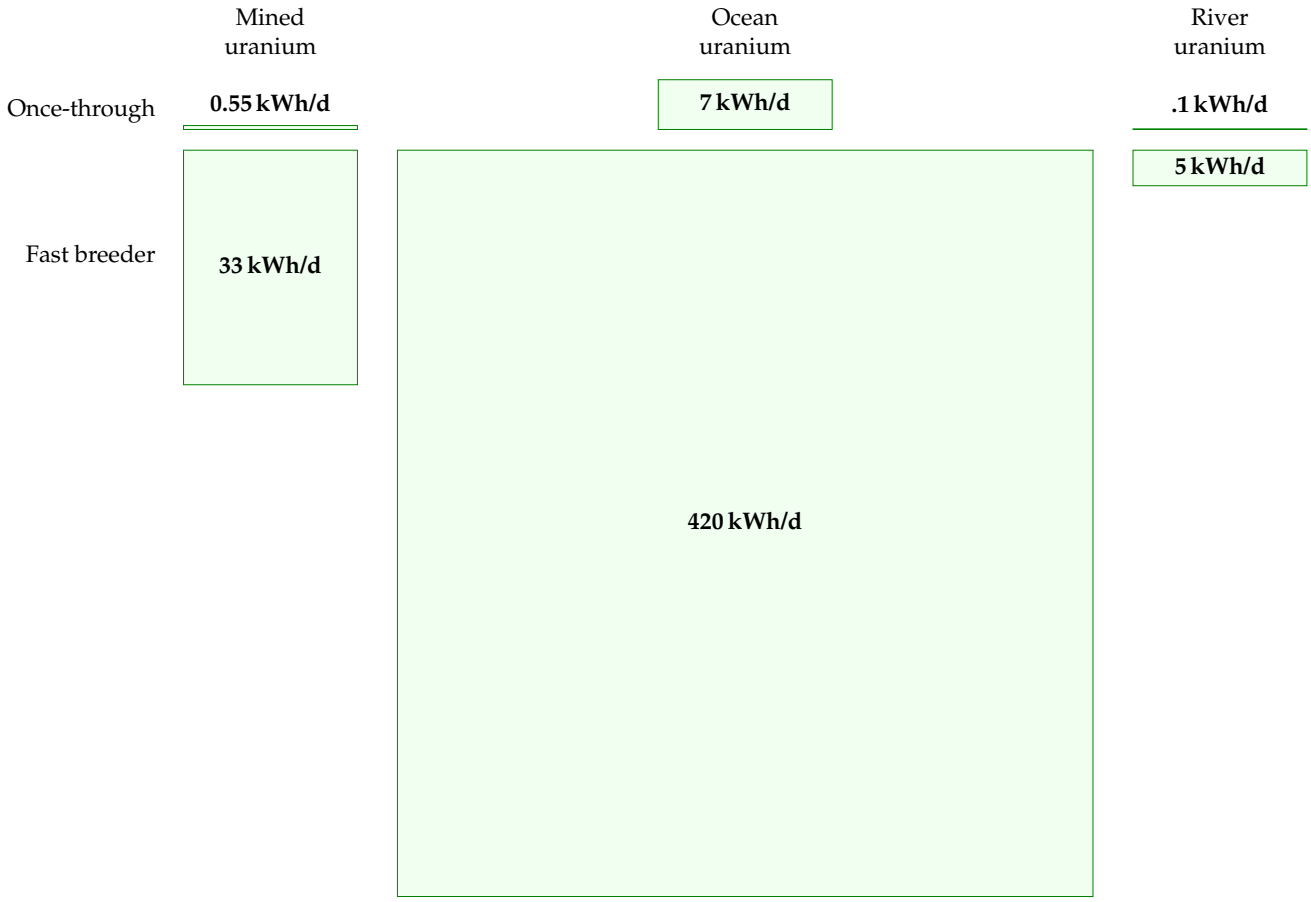


Figura 24.6. Energia "sostenibile" dall'uranio. Per confronto, si noti che la produzione mondiale di energia nucleare oggi è di 1.2 kWh/gg a persona. La produzione di energia nucleare britannica, un tempo di solito pari a 4 kWh al giorno per persona, attualmente è in declino.

obiettivo è solo quello di aiutare a capire i numeri. L'unica posizione etica che desidero portare avanti è "dobbiamo avere un piano che funzioni".

Ciclo aperto, utilizzando l'uranio degli oceani

L'uranio degli oceani, nel caso in cui sia completamente estratto ed utilizzato nei reattori a ciclo aperto, corrisponde ad un totale di energia pari a

$$\frac{4.5\,\text{mld di tonnellate per pianeta}}{162\,\text{t di uranio per GW-anno}} = 28\text{ mln GW-anno per pianeta.}$$

Quanto velocemente potrebbe essere estratto l'uranio dagli oceani? Gli oceani hanno una lenta circolazione: la metà dell'acqua è situata nell'Oceano Pacifico e le acque profonde circolano sulla superficie di questo grande convogliatore solo ogni 1600 anni. Immaginiamo che il 10% della uranio venga estratto in un tale periodo di 1600 anni. Questo è un tasso di estrazione di 280 000 tonnellate l'anno. Nei reattori a ciclo aperto, questo

significherebbe fornire potenza ad un tasso di

$$2.8 \text{ mln GW-anno} \;/\; 1600 \text{ anni} \;= 1750 \text{ GW},$$

che, suddiviso tra 6 miliardi di persone, fa 7 kWh al giorno a persona. (Attualmente sono disponibili reattori nucleari per un totale di 369 GW, quindi una tale cifra corrisponde ad un incremento dell'odierno livello di potenza da centrali nucleari pari a 4 volte). Se ne deduce che l'estrazione di uranio dagli oceani trasformerebbe i reattori a ciclo aperto di oggi in un'opzione "sostenibile" – ammesso che tali reattori siano in grado di coprire il costo energetico del processo di estrazione.

Reattori veloci autofertilizzanti, utilizzando l'uranio degli oceani

Se i reattori veloci sono 60 volte più efficienti, la medesima estrazione di uranio dall'oceano potrebbe fornire 420 kWh al giorno a persona. Finalmente, una cifra sostenibile che batte i consumi attuali! – Ma solo con l'aiuto congiunto di due tecnologie che sono rispettivamente scarsamente sviluppata e fuori moda: estrazione di uranio dagli oceani e reattori autofertilizzanti.

Utilizzando l'uranio dei fiumi

L'uranio negli oceani viene rabboccato dai fiumi, che lo forniscono ad un ritmo di 32 000 tonnellate all'anno. Se il 10% di questo afflusso venisse catturato, si avrebbe combustibile sufficiente per 20 GW di reattori a ciclo aperto oppure 1200 GW di reattori autofertilizzanti veloci. I reattori autofertilizzanti veloci consegnerebbero 5 kWh al giorno a persona.

Tutti questi numeri sono riassunti in figura 24.6.

Che dire dei costi?

Come al solito in questo libro, i miei calcoli principali hanno prestato poca attenzione all'economia. Tuttavia, poiché il potenziale contributo della potenza basata sull'uranio degli oceani è uno dei più grandi nel nostro elenco di produzione "sostenibile", mi sembra opportuno discutere se questa cifra sia di fatto economicamente plausibile.

Alcuni ricercatori giapponesi hanno scoperto una tecnica per l'estrazione dell'uranio dall'acqua di mare ad un costo di \$100–300 per chilogrammo di uranio, da confrontarsi con il costo corrente di circa \$20/kg per l'uranio da minerali. Poiché l'uranio contiene molta più energia per tonnellata rispetto ai combustibili tradizionali, un aumento di 5 o 15 volte del costo dell'uranio avrebbe poco effetto sui costi del nucleare: il prezzo del nucleare è dominato dal costo di realizzazione e dismissione, della centrale, non dal costo del combustibile. Anche un prezzo di \$300/kg farebbe aumentare il costo dell'energia nucleare di solo circa 0.3p per kWh. I costi di

estrazione dell'uranio potrebbero essere ridotti attraverso la combinazione con un altro utilizzo dell'acqua di mare – per esempio, il raffreddamento della centrale elettrica.

Non siamo, però, ancora giunti al punto cruciale: la tecnica giapponese fa sollevare la bilancia? Qual è il costo energetico della trasformazione di tutta l'acqua marina? Nell'esperimento giapponese, tre gabbie piene di materiale assorbente attira-uranio e pesanti 350 kg hanno raccolto "più di 1 kg di torta gialla in 240 giorni" [l'ossido di uranio è di colore giallo acceso. (N.d.T.)]; questa cifra corrisponde a circa 1.6 kg all'anno. Le gabbie avevano una sezione trasversale di 48 m^2. Per alimentare una centrale nucleare a ciclo aperto da 1 GW, occorrono 160 000 kg all'anno, il che significa un tasso di produzione 100 000 volte maggiore rispetto a quello dell'esperimento giapponese. Se semplicemente si mette su larga scala la tecnica giapponese, che ha accumulato uranio passivamente dal mare, allora una potenza di 1 GW wavrebbe bisogno di gabbie aventi una superficie di raccolta pari a 4.8 km^2 e contenenti materiale assorbente per un peso di 350 000 tonnellate – più del peso dell'acciaio nel reattore stesso. Volendo mettere questi grandi numeri in termini umani, se l'uranio erogasse, per dire, 22 kWh al giorno per persona, ogni reattore da 1 GW dovrebbe essere condiviso tra 1 milione di persone, ognuna delle quali avrebbe bisogno 0.16 kg di uranio all'anno. Pertanto ogni persona richiederebbe un decimo del impianto sperimentale giapponese, con un peso di 35 kg a persona ed una superficie di 5 m^2 a persona. La proposta di creare impianti per l'estrazione dell'uranio in tal guisa è, quindi, simile in scala a proposte del tipo: "ogni persona dovrebbe disporre di 10 m^2 di pannelli solari" e "ogni persona dovrebbe possedere un'auto da una tonnellata con annesso parcheggio riservato". Un grande investimento, sì, ma non assurdamente fuori scala. E questo era il calcolo per i reattori a ciclo aperto. Per i reattori autofertilizzanti veloci, è richiesto 60 volte di meno uranio, per cui la massa del collettore di uranio a persona ammonterebbe a 0.5 kg.

Paese	Riserve (1000 t)
Turchia	380
Australia	300
India	290
Norvegia	170
USA	160
Canada	100
Sud Africa	35
Brasile	16
Altri Paesi	95
Totale Mondo	1 580

Tabella 24.7. Risorse mondiali note di torio nella monazite (estraibile a buon mercato).

Torio

Il torio è un elemento radioattivo simile all'uranio. Un tempo usato per fabbricare reticelle per lampade a gas, è circa tre volte più abbondante nella crosta terrestre dell'uranio. Il suolo contiene comunemente intorno a 6 parti per milione di torio ed alcuni minerali contengono ossido di torio per il 12%. L'acqua di mare contiene poco torio, perché l'ossido di torio è insolubile. Il torio può essere completamente bruciato in reattori semplici (a differenza dei reattori ad uranio standard che utilizzano solo l'1% dell'uranio naturale). Il torio è impiegato nei reattori nucleari in India. Se il minerale di uranio andrà esaurendosi, il torio, probabilmente, diventerà il combustibile nucleare dominante.

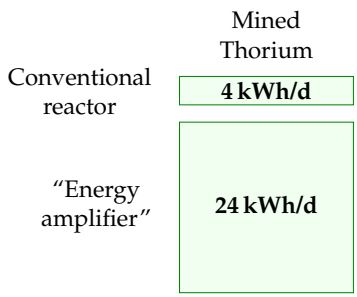


Figura 24.8. Opzioni per il torio.

I reattori a torio erogano 3.6 miliardi di kWh di calore per tonnellata di torio, questo implica che un reattore da 1 GW richiede circa 6 tonnellate

di torio all'anno, assumendo che i generatori abbiano un'efficienza del 40%. Le risorse mondiali di torio sono stimate per un totale di circa 6 milioni di tonnellate, quattro volte di più delle riserve note indicate nella tabella 24.7. Come con le risorse di uranio, sembra plausibile che queste risorse di torio siano sottostimate, dato che la prospezione del torio non è molto apprezzata oggi come oggi. Se si assume, come con l'uranio, che queste risorse si esauriscano in 1000 anni e siano ripartite equamente tra 6 miliardi di persone, si trova che la potenza "sostenibile" così generata è di 4 kWh/gg a persona.

Un reattore nucleare alternativo per il torio, "l'amplificatore di energia" o "reattore subcritico" [acronimo ADS, letteralmente: sistema guidato da un acceleratore (di neutroni). (N.d.T.)] proposto dal premio Nobel Carlo Rubbia e dai suoi colleghi , convertirebbe, secondo le loro stime, 6 milioni di tonnellate di torio in 15 000 TW-anno di energia, ossia 60 kWh/gg a persona per 1000 anni. Assumendo che la conversione in elettricità avvenga con un'efficienza del 40%, questo consegnerebbe 24 kWh/gg a persona per 1000 anni. In aggiunta, i rifiuti dal amplificatore di energia sarebbero molto meno radioattivi. Essi sostengono che, a tempo debito, molto più torio diverrebbe economicamente estraibile rispetto alle attuali 6 milioni di tonnellate. Se quello che suggeriscono – 300 volte di più – è corretto, allora il torio e l'amplificatore di energia potrebbero offrire 120 kWh/gg a persona per 60 000 anni.

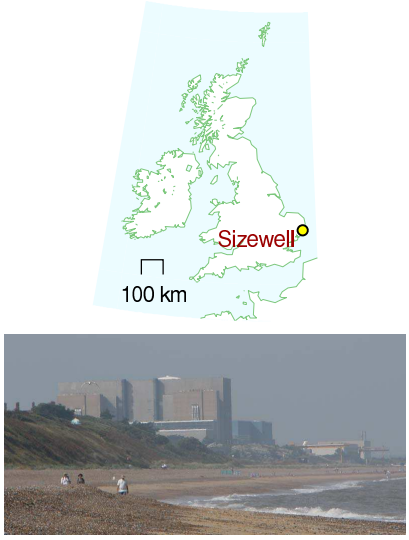


Figura 24.9. Centrali di Sizewell. Sizewell A, in primo piano, aveva una capacità di 420 MW ed è stata chiusa alla fine del 2006. Sizewell B, dietro, ha una capacità di 1.2 GW. Foto di William Connolley.

Uso del territorio

Immaginiamo che la Gran Bretagna decida di fare sul serio circa l'uscire dai combustibili fossili e costruisca un sacco di nuovi reattori nucleari, anche se tutto questo potrebbe non essere "sostenibile". Se si fabbricano abbastanza reattori per rendere possibile una decarbonizzazione significativa di trasporti e riscaldamento, poi dove li si colloca tutti questi reattori nucleari richiesti in Gran Bretagna? Il numero che occorre conoscere è la potenza per unità di superficie di una centrale nucleare, che è all'incirca 1000 W/m^2 (figura 24.10). Immaginiamo di generare 22 kWh al giorno per persona da nucleare – il che equivale a 55 GW (più o meno la stessa potenza nucleare della Francia), che potrebbero essere erogati da 55 centrali nucleari, ciascuna occupante un chilometro quadrato. Questo corrisponde a circa lo 0.02% della superficie del Paese. Dei parchi eolici che erogassero la stessa potenza media richiederebbero una porzione di territorio 500 volte superiore: 10% del Paese. Se le centrali nucleari fossero disposte a coppie lungo la costa (lunghezza di circa 3000 km, con una risoluzione di 5 km), allora ce ne sarebbero due ogni 100 km. Così, mentre l'area richiesta è modesta, la frazione di costa fagocitata da queste centrali sarebbe circa il 2% (2 chilometri ogni 100).

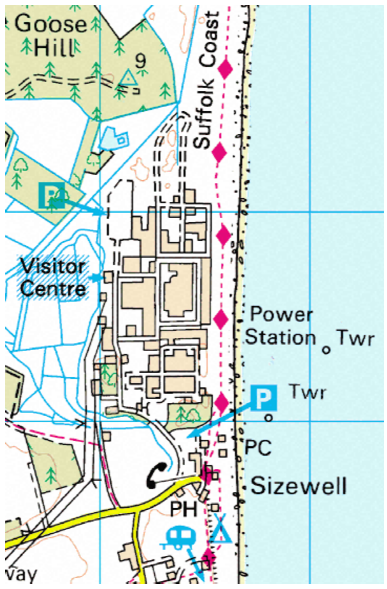


Figura 24.10. Sizewell occupa meno di 1 km^2. Il passo della griglia blu è di 1 km. © Crown copyright; Ordnance Survey.

Economia della pulizia

Qual è il costo di bonifica dei siti nucleari? La Nuclear Decommissioning Authority ha un budget annuale di £2 mld per i prossimi 25 anni. L'industria nucleare ha venduto a tutti nel Regno Unito 4 kWh/gg per circa 25 anni, quindi il costo della Nuclear Decommissioning Authority ammonta a 2.3 p/kWh. Questo è un contributo pesante – anche se, va detto, non tanto pesante quanto la sovvenzione attualmente data all'eolico off-shore (7 p/kWh). Inoltre, la maggior parte del costo della pulizia nucleare è associato agli stabilimenti di produzione delle armi e non alle centrali elettriche per usi civili.

Sicurezza

La sicurezza delle attività nucleari in Gran Bretagna continua a destare preoccupazioni. L'impianto di riprocessamento THORP a Sellafield, costruito nel 1994 ad un costo di £1.8 mld, ha subito una perdita che è andata via via crescendo da agosto 2004 ad aprile 2005. Più di otto mesi, nei quali la perdita ha permesso a *85 000 litri* di fluido ricco di uranio di fluire in una vasca, che era dotata di sistemi di sicurezza progettati per rilevare immediatamente qualsiasi perdita di appena *15 litri*. Ma la perdita non è stata individuata, in quanto gli operatori non avevano completato quelle verifiche che avrebbero assicurato che i sistemi di sicurezza funzionavano; inoltre, tali operatori avevano l'abitudine di ignorare gli allarmi di sicurezza in ogni caso.

Il sistema di sicurezza era dotato sia di cintura che di bretelle. Indipendentemente dal fatto che gli allarmi di sicurezza avessero fallito, le misure di sicurezza di routine concernenti i fluidi nella vasca avrebbero dovuto rilevare la presenza anomala di uranio entro un mese dall'inizio della perdita. Ma spesso gli operatori non si sono preoccupati di fare queste misure di routine, perché si sentivano troppo occupati, e quando finalmente *hanno effettuato* le misure e queste hanno rilevato la presenza anomala di uranio nella vasca (28 agosto 2004, 26 novembre 2004 e 24 febbraio 2005), non è stata intrapresa alcuna azione a riguardo.

Entro Aprile 2005, erano "trapelate" *22 tonnellate* di uranio, ma ancora nessuno dei sistemi di rilevamento aveva individuato la perdita. Questa è stata, infine, rilevata dalla *contabilità*, allorché i conta-fagioli [ragionieri contabili. (N.d.T.)] hanno notato che stavano ottenendo in uscita un 10% in meno di uranio rispetto a quanto dichiarato in entrata dai loro clienti! Grazie al cielo questa azienda privata era a scopo di lucro, eh? La critica dell'Ispettore Capo degli impianti nucleari è stata fulminante: "L'impianto era gestito con una cultura della sicurezza che apparentemente consentiva agli strumenti di operare in modalità-allarme, piuttosto che favorire l'attitudine a chiedersi il perché l'allarme suonasse e a procedere con la rettifica del relativo guasto".

Se lasciamo che aziende private costruiscano nuovi reattori, come possiamo garantire che standard di sicurezza più elevati vengano rispettati? Non lo so.

Allo stesso tempo, non dobbiamo lasciarci travolgere dal terrore per i pericoli del nucleare. L'energia nucleare non è infinitamente pericolosa. È solo pericolosa, tanto quanto le miniere di carbone, i depositi di benzina, il bruciare combustibili fossili e le turbine eoliche. Anche se non vi è garanzia alcuna che gli incidenti nucleari in futuro siano evitati in assoluto, penso che il modo giusto di valutare il nucleare sia quello di confrontarlo in modo obiettivo con altre fonti di energia. Le centrali elettriche a carbone, per esempio, espongono la popolazione alle radiazioni nucleari, dato che le ceneri di carbone in genere contengono uranio. Infatti, secondo un articolo pubblicato sulla rivista *Science*, le persone che in America vivono vicino a centrali elettriche a carbone sono esposte a dosi di radiazioni superiori rispetto a quelle che vivono nei pressi di centrali nucleari.

Nella quantificazione del rischio pubblico attinente le diverse fonti di energia, occorre una nuova unità di misura. Prendiamo il "numero di morti per GW-anno (gigawatt-anno)". Cercherò di trasmettere che cosa significhi che una fonte di energia ha avuto un tasso di mortalità di 1 decesso per GW-anno. Un gigawatt-anno è l'energia prodotta da una centrale da 1 GW, se funziona a tutto spiano per un anno. Il consumo di energia elettrica della Gran Bretagna ammonta a circa 45 GW o, se volete, 45 gigawatt-anno per anno. Pertanto, se si è ottenuta l'elettricità da fonti con un tasso di mortalità di 1 decesso per GW-anno, significa che il sistema di fornitura dell'energia elettrica britannica ha ucciso 45 persone all'anno. Per confronto, 3000 persone muoiono ogni anno sulle strade della Gran Bretagna. Quindi, se *non* è in atto una campagna per l'abolizione delle strade, se ne può dedurre che "1 decesso per GW-anno" sia un tasso di mortalità con il quale si potrebbe vivere contenti, per quanto il dato rimanga di per sé triste. Ovviamente, 0.1 morti ogni GW-anno sarebbe preferibile, ma ci vuole solo un attimo di riflessione per rendersi conto che, purtroppo, la produzione di energia da combustibili fossili ha necessariamente un costo superiore a 0.1 morti ogni GW-anno – basti pensare ai disastri sulle piattaforme petrolifere, agli elicotteri caduti in mare, agli incendi, alle esplosioni nei gasdotti delle raffinerie ed agli incidenti nelle miniere di carbone: ci sono decine di morti lungo la catena del fossile ogni anno in Gran Bretagna.

Proviamo, dunque, a discutere i tassi di mortalità effettivi di una serie di fonti di energia elettrica. I tassi di mortalità variano molto da Paese a Paese. In Cina, per esempio, il tasso di mortalità nelle miniere di carbone, per tonnellata di carbone fornito, è di 50 volte superiore a quello della maggior parte delle nazioni. La Figura 24.11 mostra i numeri di uno studio del Paul Scherrer Institute e quelli provenienti da un progetto dell'Unione Europea denominato ExternE; entrambi hanno fatto le stime complete di tutti gli impatti della produzione di energia. Secondo i dati UE, il carbone,

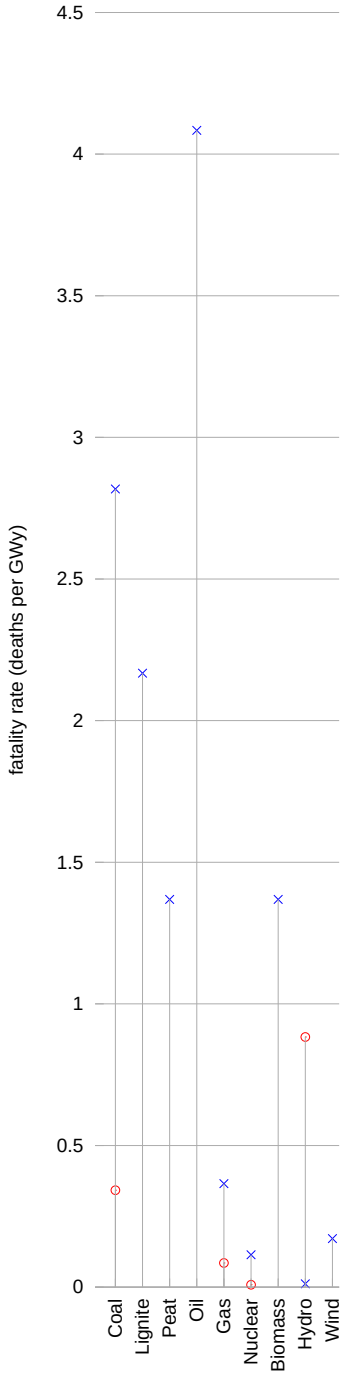


Figura 24.11. Tassi di mortalità delle tecnologie per la produzione di energia elettrica. ×: stime dell'Unione Europea dal progetto ExternE. ○: Paul Scherrer Institute.

la lignite e l'olio combustibile hanno i tassi di mortalità più elevati, seguiti da torba e biomasse, con tassi di mortalità superiori a 1 decesso per GW-anno. Nucleare ed eolico sono i migliori, con tassi di mortalità inferiori a 0.2 per GW-anno. L'energia idroelettrica è la migliore di tutti, secondo lo studio UE, ma esce peggio nello studio del Paul Scherrer Institute, perché quest'ultimo ha esaminato un diverso insieme di Paesi.

Centrali nucleari intrinsecamente sicure

Spronati dalle preoccupazioni per gli incidenti nucleari, gli ingegneri hanno messo a punto molti nuovi reattori con caratteristiche di sicurezza migliorate. Per esempio, si sostiene che le centrali del tipo GT-MHR [acronimo per Gas Turbine Modular Helium Reactor – vale a dire un reattore modulare dove il gas elio funge da refrigerante/termo-vettore ed aziona direttamente la turbina senza che occorra generare vapore secco. (N.d.T.)] siano intrinsecamente sicure e che, per di più, abbiano una maggiore efficienza di conversione del calore in elettricità delle centrali nucleari convenzionali [`gt-mhr.ga.com`].

False credenze

Due difetti ampiamente citati del nucleare sono i costi di costruzione ed i rifiuti. Esaminiamo alcuni aspetti di queste problematiche.

Costruire una centrale nucleare richiede* enormi *quantità di cemento ed acciaio, materiali la cui fabbricazione comporta un* enorme *inquinamento da CO_2.

Acciaio e cemento in una centrale nucleare da 1 GW hanno un'impronta di carbonio pari a circa 300 000 t CO_2.

Spalmando questo numero "enorme" lungo l'intera vita di un reattore che abbia 25 anni, è possibile esprimere il contributo all'intensità delle emissioni di carbonio nelle unità standard (g CO_2 per kWh(e)):

$$\begin{aligned}\text{intensità delle emissioni di carbonio associate alla costruzione} &= \frac{300\times10^9\,\mathrm{g}}{10^6\,\mathrm{kW(e)}\times220\,000\,\mathrm{h}}\\ &= 1.4\,\mathrm{g/kWh(e)},\end{aligned}$$

un valore molto più piccolo del parametro di riferimento dei combustibili fossili, pari a 400 g CO_2/kWh(e). L'IPCC stima che l'intensità delle emissioni di carbonio *totale* dell'energia nucleare (ivi compresi costruzione, trattamento del combustibile e smantellamento) è inferiore a 40 g CO_2/kWh(e) (Sims et al., 2007).

Vi prego, non fraintendete: non è che provo a fare il pro-nucleare. Semplicemente sono pro-aritmetica.

Figura 24.12. La centrale di Chernobyl (in alto) e la città abbandonata di Prypiat, che la serviva (in basso). Foto di Nik Stanbridge.

I rifiuti provenienti dai reattori nucleari sono o non sono un problema enorme?

Come abbiamo osservato in apertura di questo capitolo, il volume dei rifiuti da reattori nucleari è relativamente piccolo. Considerando che le ceneri provenienti da dieci centrali elettriche a carbone avrebbero una massa di quattro milioni di tonnellate all'anno (con un volume di circa 40 litri per persona all'anno), i rifiuti nucleari provenienti da dieci centrali nucleari della Gran Bretagna hanno un volume di appena 0.84 litri per persona all'anno pensate a questo come ad una bottiglia di vino per persona per anno (figura 24.13).

Gran parte di questi rifiuti sono scorie a basso livello di radio-attività. Il 7% sono rifiuti radioattivi di livello intermedio ed appena il 3% – 25 ml ml all'anno – è altamente radioattivo.

La roba veramente "brutta" sono i rifiuti ad alto livello di radioattività. È convenzione mantenere i rifiuti ad alto livello presso il reattore durante i suoi primi 40 anni di vita. Vengono immagazzinati dentro piscine di acqua e raffreddati. Dopo 40 anni, il livello di radioattività è sceso di 1000 volte. Il livello di radioattività continua a scendere e nel caso in cui si riprocessino i rifiuti, separando uranio e plutonio per il riutilizzo in nuovo combustibile nucleare, allora, dopo 1000 anni, la radioattività delle scorie ad alto livello sarà circa la stessa di quella del minerale al momento dell'estrazione.

E questo sarebbe un problema difficile? 1000 anni sono certamente un tempo molto lungo rispetto alla vita di Governi e Paesi! Ma i volumi sono così piccoli, che ritengo i rifiuti nucleari solo una preoccupazione minore, rispetto a tutte le altre forme di rifiuti che stiamo infliggendo alle generazioni future. A 25 ml all'anno, una vita intera passata a raccogliere scorie nucleari di alto livello darebbe come risultato meno di 2 litri. Anche moltiplicando per 60 milioni di persone, il volume delle scorie nucleari per durata di vita delle persone non appare ingestibile: 105 000 metri cubi. Lo stesso volume di 35 piscine olimpioniche. Se tutti questi rifiuti fossero disposti in un unico strato profondo un metro, occuperebbero solo un decimo di un chilometro quadrato.

Ci sono già un sacco di posti interdetti agli esseri umani. Non si può sconfinare nel vostro giardino. Né si dovrebbe in una miniera. Nessuno di noi è il benvenuto a Balmoral [castello situato nell'Aberdeenshire, Scozia ed adibito a residenza privata della Famiglia Reale. (N.d.T.)]. Segnali di "vietato l'ingresso" sono un po' ovunque. Downing Street, l'aeroporto di Heathrow, strutture militari, miniere dismesse – tutti off-limits. È davvero impossibile immaginare di creare un altro luogo, una zona di un chilometro quadrato – magari sotterranea, in profondità – off-limits per 1000 anni?

Si confrontino questi 25 ml all'anno per persona di rifiuti nucleari ad alto livello di radioattività con le altre forme tradizionali di rifiuti che attualmente vanno in discarica: rifiuti urbani – 517 kg all'anno per persona; rifiuti pericolosi – 83 kg all'anno per persona.

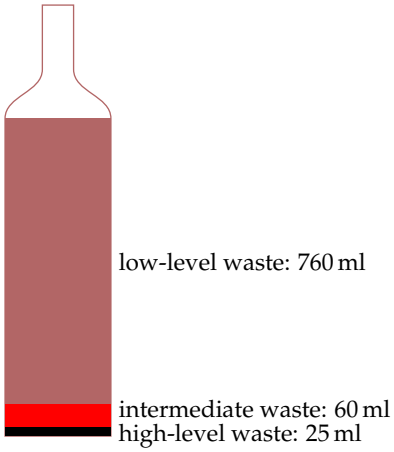


Figura 24.13. Le scorie nucleari britanniche, per persona, per anno, occupano un volume solo un po' più grande di una bottiglia di vino.

La gente a volte confronta le eventuali nuove scorie nucleari con quelle con cui abbiamo già a che fare, grazie ai nostri vecchi reattori. Qui ci sono i numeri per il Regno Unito. Il volume previsto di "scorie a maggiore attività" fino al 2120, a seguito dello smantellamento degli impianti nucleari esistenti, è di 478 000 m^3. Di questo volume, il 2% (circa 10 000 m^3) sarà costituito dai rifiuti radioattivi di livello elevato (1290 m^3)e dal combustibile esausto (8150 m^3) , che insieme contengono il 92% della radioattività. Costruire 10 nuovi reattori nucleari (10 GW) dovrebbe aggiungere altri 31 900 m^3 di combustibile esausto a questo totale. Vale a dire lo stesso volume di dieci piscine.

Se ottenessimo un sacco di energia da fissione o fusione, questo non contribuirebbe al riscaldamento globale, a causa di tutta l'energia in più rilasciata nell'ambiente?

Questa è una domanda divertente. Dato che abbiamo accuratamente espresso tutto in questo libro con un unico insieme di unità di misura, è abbastanza facile rispondere. In primo luogo, cerchiamo di ricapitolare i numeri chiave circa l'equilibrio energetico globale a partire da pagina 24: la potenza solare media assorbita da atmosfera, terra ed oceani è di 238 W/m^2; un raddoppio della concentrazione atmosferica di CO_2 farebbe aumentare il riscaldamento netto di 4 W/m^2. Questo aumento del riscaldamento globale pari al 1.7% è ritenuto essere una cattiva notizia per il clima. Le variazioni di energia del sole durante il ciclo solare di 11 anni hanno una portata di 0.25 W/m^2. Stando così le cose, supponiamo ora che in 100 anni o giù di lì la popolazione mondiale sia di 10 miliardi e che tutti vivano con uno standard di vita europeo, utilizzando 125 kWh al giorno provenienti da fonti fossili, dal nucleare o da energia geotermica. La superficie terrestre a persona ammonterebbe a 51 000 m^2. Dividendo la potenza per persona per la superficie a persona, si trova che il contributo aggiuntivo in termini di potenza impiegata per gli usi energetici dell'umanità sarebbe di 0.1 W/m^2. Questo è un quarantesimo di quei 4 W/m^2 that riguardo ai quali ci si agita così tanto ed è un po' più piccolo dei 0.25 W/m^2 effetto delle variazioni solari. Quindi sì, con questi presupposti, la produzione umana di energia arriva *appena* ad affacciarsi sulla scena, quale contributo al cambiamento climatico globale.

Ho sentito dire che il nucleare non può essere costruito ad una velocità sufficiente per dare un contributo utile.

La difficoltà di costruire strutture per la produzione di energia nucleare in modo veloce è stata esagerata tramite l'aiuto di una tecnica di presentazione ingannevole, che io chiamo il "terreno di gioco magico". In questa tecnica, due cose sembrano essere messe a confrontato, ma la base del confronto è come un campo da gioco con i riflettori accesi solo su di una metà. Il Redattore del Guardian per l'ambiente, riassumendo una relazione dell'*Oxford Research Group*, ha scritto "Perché l'energia nucleare dia

un contributo significativo alla riduzione delle emissioni globali di carbonio nelle prossime due generazioni, l'industria dovrebbe costruire quasi 3000 nuovi reattori – ovvero circa uno alla settimana per 60 anni. Un programma di approvvigionamento e costruzione di sistemi e strutture per il nucleare civile su questa scala è una chimera, del tutto irrealizzabile. Il più alto tasso storico è di 3.4 nuovi reattori all'anno". 3000 suona molto più grande di 3.4, non è vero!? In questa applicazione della tecnica del "terreno di gioco magico", c'è un interruttore azionato non solo sulla scala dei tempi ma anche sulla *zona*. Mentre la prima cifra (3000 nuovi reattori in 60 anni) è il numero necessario *per l'intero Pianeta*, la seconda cifra (3.4 nuovi reattori all'anno) è il tasso massimo di costruzione per un *singolo Paese* (Francia)!

Una presentazione più onesta avrebbe mantenuto il confronto su una base per-pianeta. La Francia possiede 59 dei 429 reattori nucleari operativi nel mondo, quindi è plausibile che il più alto tasso di costruzione di reattore su scala planetaria sia qualcosa come dieci volte quello della Francia, cioè 34 nuovi reattori all'anno. E il tasso richiesto (3000 nuovi reattori in 60 anni) è di 50 nuovi reattori all'anno. Quindi affermare che "la costruzione di nucleare civile su questa scala è una chimera, del tutto irrealizzabile" è una stupidaggine. Certo, si tratta di un elevato tasso di costruzione, ma si trova nello stesso campo di gioco dei tassi di costruzioni storici.

Quanto è ragionevole la mia affermazione che il tasso di costruzione storico massimo del mondo deve essere stato di circa 34 nuovi reattori nucleari all'anno? Diamo un'occhiata ai dati. La Figura 24.14 mostra la potenza del parco nucleare nel mondo in funzione del tempo, mostrando solo le centrali ancora in funzione nel 2007. Il più grande tasso di nuova costruzione si ha avuto nel 1984, con un valore di (rullo di tamburo, per favore ...) circa 30 GW all'anno – più o meno 30 reattori da 1 GW. Eccovi serviti!

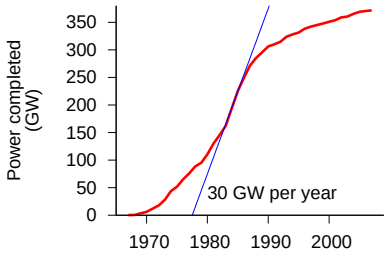


Figura 24.14. Grafico della potenza nucleare totale disponibile nel mondo in base a quanto costruito dal 1967 ed ancora operativo oggi. Il tasso di costruzione mondiale ha avuto un picco di 30 GW di potenza nucleare per anno nel 1984.

E la fusione nucleare?

> *Diciamo che metteremo il sole in una scatola. L'idea è carina. Il problema è che non sappiamo come fare la scatola.*
>
> Sébastien Balibar, Direttore della Ricerca, CNRS

L'energia da fusione nucleare ha carattere speculativo e sperimentale. Penso che sia imprudente presupporre che i problemi inerenti la fusione *verranno* annientati, ma sono felice di stimare la quantità di energia che la fusione nucleare potrebbe fornire, *nel caso in cui* i problemi fossero risolti.

Le due reazioni di fusione considerate le più promettenti sono:

la reazione DT, che fonde deuterio con trizio, dando elio; e

la reazione DD, wche fonde deuterio con altro deuterio.

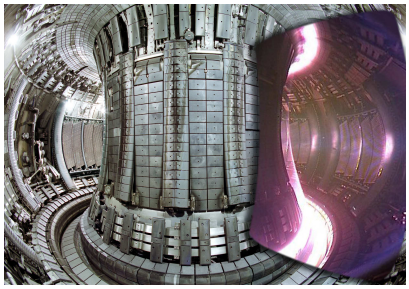


Figura 24.15. Interno di un reattore sperimentale a fusione. L'immagine mostra la camera a vuoto del JET [acronimo inglese: Joint European Torus – in sostanza un reattore Tokamak. (N.d.T.)] insieme all'immagine parzialmente sovrapposta del plasma, catturata con una normale fotocamera TV. Foto: EFDA-JET.

Il deuterio, un isotopo naturale e pesante dell'idrogeno, può essere ottenuto dall'acqua di mare, il trizio, altro isotopo pesante dell'idrogeno, non si trova in grandi quantità in natura (perché ha un tempo di dimezzamento [detto anche emi-vita. (N.d.T.)] di soli 12 anni), ma può essere prodotto a partire dal litio.

ITER è un progetto internazionale per capire come fabbricare un reattore a fusione che lavori in modo stabile. Il prototipo ITER utilizzerà la reazione DT. Si preferisce la reazione DT alla DD, perché la DT produce più energia e perché richiede una temperatura di innesco di "soli" 100 milioni di °C mentre la reazione DD richiede 300 milioni di °C. (La temperatura massima del sole è di 15 milioni di °C.)

Fantastichiamo un po' e supponiamo che il progetto ITER abbia successo. Quale potenza sostenibile potrebbe, dunque, consegnarci la fusione? Centrali elettriche che utilizzassero la reazione DT, alimentata dal litio, si troverebbero a corto di succo una volta esaurito il litio. Prima di allora, si spera di essere giunti al secondo capitolo del nostro romanzo fantascientifico: reattori a fusione che utilizzano solo deuterio.

Chiamerò queste due fantastiche fonti di energia "fusione al litio" e "fusione al deuterio", prendendo il nome dal combustibile principale di cui dovremmo preoccuparci. Vediamo ora di stimare quanta energia ciascuna di queste fonti potrebbe fornire.

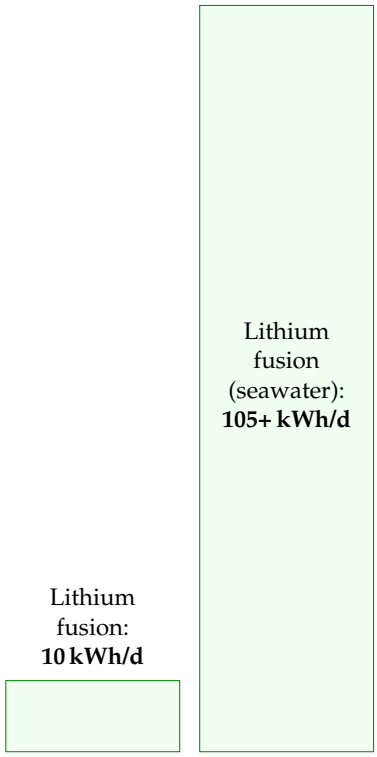


Figura 24.16. La fusione a base di litio, se utilizzata in modo corretto e "sostenibile", potrebbe eguagliare i nostri attuali livelli di consumo. Il litio estratto in miniera consegnerebbe 10 kWh/gg a persona per 1000 anni; il litio estratto dall'acqua di mare potrebbe fornire 105 kWh/gg a persona per oltre un milione di anni.

Fusione al litio

Le riserve mondiali di litio sono stimati per 9.5 milioni di tonnellate di depositi di minerale. Se tutte queste riserve fossero dedicate alla fusione in un arco di tempo pari a 1000 anni, la potenza erogata sarebbe di 10 kWh/gg a persona.

C'è un'altra fonte di litio: l'acqua di mare, dove il litio ha una concentrazione di 0.17 ppm. Per produrre litio ad un tasso di 100 milioni di kg all'anno da acqua marina si stima occorra un fabbisogno energetico di 2.5 kWh(e) per grammo di litio. Se i reattori a fusione restituiscono 2300 kWh(e) per grammo di litio, la potenza consegnata sarebbe quindi pari a 105 kWh/gg a persona (assumendo una popolazione di 6 miliardi di persone). A questo ritmo, il litio negli oceani durerebbe più di un milione di anni.

Fusione al deuterio

Se pensiamo che scienziati e ingegneri risolvano il problema di far funzionare la reazione DD, allora c'è qualche notizia molto buona. Ci sono 33 g di deuterio in ogni tonnellata di acqua, e l'energia che scaturirebbe dalla fusione di un solo grammo di deuterio è da capogiro: 100 000 kWh. Tenendo presente che la massa degli oceani è di 230 milioni di tonnellate a persona, si deduce che ci sia deuterio sufficiente per rifornire tutte le

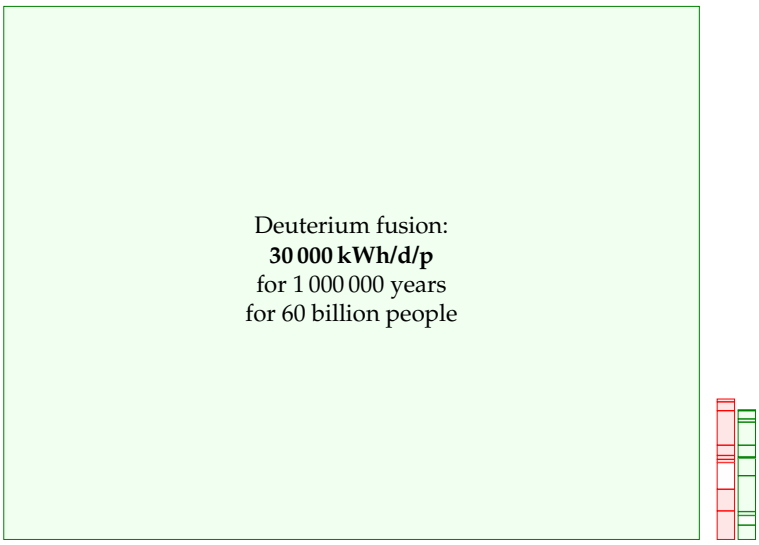


Figura 24.17. La fusione a base di deuterio, nel caso in cui fosse realizzabile, offrirebbe energia sostenibile in abbondanza per milioni di anni. La scala di questo diagramma è stata ridotta dieci volte in ogni dimensione, in modo da adattare il potenziale contributo della fusione alle dimensioni della pagina. Le pile rossa e verde di figura 18.1 sono mostrate di fianco con la medesima scala, per confronto.

persone in una popolazione mondiale aumentata di dieci volte con una potenza di 30 000 kWh al giorno (ossia più di 100 volte il consumo medio americano) per 1 milione di anni (figura 24.17).

Note ed approfondimenti

p.

178 *Figura 24.1*. Fonte: World Nuclear Association [`5qntkb`]. La capacità totale dei reattori nucleari operabili è 372 GW(e), utilizzando 65 000 tonnellate di uranio all'anno. Gli Stati Uniti dispongono di 99 GW, la Francia 63.5 GW, il Giappone 47.6 GW, la Russia 22 GW, la Germania 20 GW, la Corea del Sud 17.5 GW, l'Ucraina 13 GW, il Canada 12.6 GW e il Regno Unito 11 GW. Nel 2007 tutti i reattori del mondo hanno generato complessivamente 2608 TWh di energia elettrica, vale a dire una media di 300 GW ossia 1.2 kWh al giorno per persona.

179 *I reattori veloci autofertilizzanti ottengono 60 volte più energia dal uranio.* Fonte: `www.world-nuclear.org/info/inf98.html`. Il Giappone è attualmente alla guida dello sviluppo dei reattori autofertilizzanti veloci [interessanti anche i progressi dei Russi. (N.d.T.)].

180 *Una centrale nucleare a ciclo aperto da un giga-watt utilizza 162 tonnellate all'anno di uranio*.
Fonte: `www.world-nuclear.org/info/inf03.html`. Un impianto da 1 GW(e) con un rendimento termico del 33%, in esercizio con un fattore di carico del 83%, a monte presenta la seguente impronta: estrazione – 16 600 tonnellate di minerale di cui l'1% è uranio; molitura – 191 t di ossido di uranio (contenete 162 t di uranio naturale); arricchimento e fabbricazione del combustibile – 22.4 t di ossido di uranio (contenenti 20 t di uranio arricchito). L'arricchimento richiede 115 000 ULS; si veda pagina 113 per il costo energetico di una ULS (Unità di Lavoro Separativo).

– *è stato stimato che le risorsa minerarie a basso contenuto di uranio sono più di 1000 volte superiori ai 27 milioni di tonnellate che abbiamo appena assunto*. Deffeyes and MacGregor (1980) stimano che le risorse di uranio a concentrazioni di 30 ppm o più ammontino a 3×10^{10} t. (Il valore medio del contenuto di uranio nel minerale trasformato in Sud Africa nel 1985 e nel 1990 era di 150 ppm. I fosfati in genere ne contengono in media 100 ppm.)
Ecco cosa ha detto la World Nuclear Association in tema di riserve di uranio nel giugno 2008:

"Di quando in quando vengono sollevate preoccupazioni sul fatto che le risorse potrebbero essere insufficienti stabilendo quale multiplo il tasso attuale di utilizzo. Ma questa è la fallacia dei Limiti dello Sviluppo [letteralmente: limiti alla crescita – concetto che anima il variegato dibattito su scarsità delle risorse, progresso e de-crescita. (N.d.T.)], ... che non tiene conto della natura molto limitata della conoscenza, che abbiamo in qualsiasi momento, di ciò che si trova realmente nella crosta terrestre. La nostra conoscenza della geologia è tale che possiamo essere fiduciosi del fatto che le risorse individuate di minerali metallici sono una piccola frazione di quello che c'è".
"La risorsa di uranio misurata, la quantità nota per essere economicamente recuperabile dai giacimenti ... dipende dall'intensità dello sforzo impiegato in passato per l'esplorazione e fondamentalmente è una dichiarazione su ciò che è noto, piuttosto che di quello che si trova in effetti nella crosta terrestre".
"Le attuali risorse mondiali di uranio misurate (5.5 Mt) ... sono sufficienti per durare 80 anni e più. Questo rappresenta un livello di risorse assicurate normale per la maggior parte dei minerali. Ulteriori esplorazioni e prezzi più elevati, sulla base delle attuali conoscenze geologiche, senza alcun dubbio consegneranno ulteriori risorse, allorché quelle attuali andranno esaurite".
"Speculatori economici razionali investiranno nella ricerca di queste nuove riserve esclusivamente quando saranno più fiduciosi di ottenere un ritorno dal loro investimento, il che di solito richiede messaggi positivi inerenti i prezzi, causati dalla tendenza delle scorte a scarseggiare. Se il sistema economico funziona correttamente e massimizza l'efficienza del capitale, non dovrebbe mai esserci più di un paio di decenni di qualunque risorsa in riserva in qualsiasi momento".
[L'esplorazione ha un costo; quella dell'uranio, per esempio, ha avuto un costo di $1–$1.50 per kg di uranio ($3.4/MJ), che è il 2% del prezzo corrente di $78/kgU; al contrario, i costi di ritrovamento del petrolio greggio sono stati in media all'incirca di $6 al barile ($1050/MJ) (12% del prezzo spot), questo almeno negli ultimi tre decenni].
"A differenza dei metalli che sono stati richiesti per secoli, la società ha appena iniziato a utilizzare l'uranio. C'è stato solo un ciclo di esplorazione-scoperta-produzione, guidato in gran parte dai picchi degli ultimi anni '70".
"È prematuro parlare di scarsità di uranio a lungo termine, quando l'intera industria nucleare è così giovane che è stato richiesto un solo ciclo di ricostituzione delle risorse". `www.world-nuclear.org/info/inf75.html`
Ulteriori letture consigliate: Herring (2004); Price and Blaise (2002); Cohen (1983).
Le proiezioni dell'IPCC, citando l'OCSE, indicano che, ai livelli di utilizzo del 2004, l'uranio in risorse convenzionali e fosfati durerebbe 670 anni con i reattori a ciclo aperto, 20 000 anni con i reattori veloci ed il riciclaggio del plutonio, e 160 000 anni con i reattori veloci ed il riciclaggio dell'uranio e di tutti gli attinidi (Sims et al., 2007).

182 *Alcuni ricercatori giapponesi hanno scoperto una tecnica per estrarre uranio dall'acqua di mare*. La stima del prezzo di $100 al kg è di Seko et al. (2003) e [`y3wnzr`]; la stima di $300 al kg proviene dall'OECD Nuclear Energy Agency (2006, p. 130). La tecnica di estrazione dell'uranio implica che venga immerso nel mare per un paio di mesi un particolare tessuto, composto di fibre di polimeri che sono rese appiccicose tramite irradiazione prima che vengano inzuppate. Questi adesivi raccolgono al ritmo di 2 g di uranio per ogni chilogrammo di fibra.

183 *I costi di estrazione dell'uranio potrebbero essere ridotti combinandoli con un altro utilizzo dell'acqua di mare – per esempio, il raffreddamento della centrale elettrica.* L'idea di un impianto-isola nucleare per la produzione dell'idrogeno è stata ventilata da da C. Marchetti. I reattori sarebbero raffreddati dall'acqua di mare e l'uranio verrebbe estratto dall'acqua di raffreddamento ad una velocità di 600 t uranio per 500 000 Mt di acqua di mare.

184 *I reattori al torio forniscono 3.6×10^9 kWh di calore per tonnellata di torio*. Fonte: `www.world-nuclear.org/info/inf62.html`. Rimane spazio per avanzamenti venturi nei reattori al torio, quindi questa cifra potrebbe schizzare in alto in futuro.

– *Un reattore nucleare alternativo per il torio, "l'amplificatore di energia"...* Si veda Rubbia et al. (1995), `web.ift.uib.no/~lillestol/Energy_Web/EA.html`, [`32t5zt`], [`2qr3yr`], [`ynk54y`].

183 *Risorse mondiali di torio contenuto nella monazite.* Fonte: US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, gennaio 1999. [`yl7tkm`] Citato in UIC Nuclear Issues Briefing Paper #67, novembre 2004.
"Altri minerali da depositi con alti contenuti di torio, come la torite, diverrebbero le fonti più probabili, qualora la domanda aumentasse in modo significativo".
[`yju4a4`] omette i numeri della Turchia, che si trovano qui: [`yeyr7z`].

185 *The nuclear L'industria nucleare ha venduto a tutti nel Regno Unito 4 kWh/gg per circa 25 anni.* Il totale generato nel 2006 è stato di circa 2200 TWh. Fonte: Energy Review di Stephen Salter per il Partito Nazionale Scozzese.

185 *La Nuclear Decommissioning Authority ha un budget annuale di £2 mld.* In realtà, il bilancio del "repulisti" continua a salire. L'ultima cifra per il costo totale di disattivazione è di 73 miliardi di sterline. `news.bbc.co.uk/1/hi/uk/7215688.stm`

– *La critica dell'Ispettore Capo degli impianti nucleari è stata fulminante...* (Weightman, 2007).

186 *Il nucleare non è infinitamente pericoloso. È semplicemente pericoloso.* Per saperne di più sui rischi: Kammen and Hassenzahl (1999).

– *La gente in America che vive vicino a centrali elettriche a carbone è esposta a dosi di radiazioni superiori a quella che vive vicino alle centrali nucleari.* Fonte: McBride et al. (1978). Uranio e torio nel carbone fossile hanno rispettivamente concentrazioni grossomodo pari a 1 ppm e 2 ppm.
Ulteriori letture consigliate: `gabe.web.psi.ch/research/ra/ra_res.html`, `www.physics.ohio-state.edu/~wilkins/energy/Companion/E20.12.pdf.xpdf`.

187 *Nucleare ed eolico hanno i tassi di mortalità più bassi.* Si veda anche Jones (1984). Questi tassi di mortalità provengono da studi che stanno predicendo il futuro. Possiamo anche guardare al passato.
In Gran Bretagna, l'energia nucleare ha generato 200 GW-anno di energia elettrica e l'industria nucleare ha registrato 1 fatalità, un operaio morto a Chapelcross nel 1978 [`4f2ekz`]. Un morto ogni 200 GW-anno è un tasso di mortalità incredibilmente basso rispetto al settore dei combustibili fossili.
A livello mondiale, il tasso di mortalità storico del nucleare è di difficile stima. La fusione del nocciolo avvenuta a Three Mile Island non ha fatto vittime e le relative fuoriuscite potrebbero aver ucciso dopo l'incidente nel tempo una persona, ma è solo una stima. L'incidente-disatro di Chernobyl prima ha comportato la morte di 62 persone, direttamente esposte alle radiazioni [grazie ai molteplici risultati degli studi mai interrotti da parte di organizzazioni internazionali e gruppi di ricerca accreditati, ultimamente questo numero è stato rivisto al ribasso, come attestato da OMS, IAEA, UNSCEAR e Chernobyl Forum. (N.d.T.)] e successivamente di 15 persone del posto, che sono decedute di tumore alla tiroide con il passare del tempo. Si stima che nelle vicinanze altre 4000 persone siano morte di cancro e che in tutto il mondo siano circa 5000 i casi (tra tutte le persone esposte, circa 7 milioni, alla contaminazione della cosiddetta nube radioattiva) di morti di cancro a causa di Chernobyl (Williams and Baverstock, 2006). Tuttavia, queste morti sono impossibili da individuare con precisione, dato che molti di questi casi di cancro sono dovuti alle radiazioni nucleari naturali, che già causano il 25% dei decessi di questo tipo in Europa ["nube radioattiva" è una libera traduzione, allo scopo di non ingenerare confusione con il fallout delle esplosioni atomiche, che è intrinsecamente tutt'altra faccenda; riguardo alle vittime vale ancora la nota precedente, ricordando che l'enfasi sulla differenza tra morti stimati e morti certificati non sarà mai troppa. (N.d.T.)].
Un modo per fare una stima del tasso di mortalità globale dovuto alle centrali nucleari in tutto il mondo consiste nel dividere la stima del tributo di morte inerente Chernobyl (9000 morti) per la produzione cumulata di energia nucleare dal 1969 al 1996, che è stata di 3685 GW-anno. Da cui si ha un tasso di mortalità pari a 2.4 decessi ogni GW-anno.
Per quanto riguarda i decessi attribuiti all'eolico, l'Information Forum del parco eolico di Caithness elenca 49 fatalità in tutto il mondo dal 1970 al 2007 (35 lavoratori dell'industria eolica e 14 individui tra la popolazione) [`www.caithnesswindfarms.co.uk`]. Nel 2007, Paul Gipe ha elencato 34 morti come numero totale in tutto il mondo [`www.wind-works.org/articles/BreathLife.html`]. A metà degli anni '90 il tasso di mortalità associato all'energia eolica è stato di 3.5 decessi per GW-anno. Secondo Paul Gipe, il tasso di mortalità dell'eolico su scala mondiale è sceso a decessi ogni GW-anno entro la fine del 2000.
In questo modo i tassi di mortalità storici sia del nucleare che dell'eolico rimangono superiori ai tassi di mortalità previsti per il futuro.

– *Acciaio e cemento in una centrale nucleare da 1 GW hanno un'impronta di carbonio pari a grossomodo 300 000 t CO_2.* Una centrale nucleare da 1 GW contiene 520 000 m^3 di cemento (1.2 milioni di tonnellate) e 67 000 tonnellate di acciaio [`2k8y7o`]. Assumendo 240 kg CO_2 per m^3 di cemento [`3pvf4j`], l'impronta del cemento è di circa 100 000 t CO_2. Secondo

la Blue Scope Steel [4r7zpg], l'impronta dell'acciaio è di circa 2.5 tonnellate di CO_2 per tonnellata di acciaio. Questo significa che 67 000 tonnellate di acciaio hanno un'impronta pari a circa 170 000 tonnellate di CO_2.

188 *La discussione concernente i rifiuti nucleari.* Fonti: www.world-nuclear.org/info/inf04.html, [49hcnw], [3kduo7]. *Rifiuti nucleari nuovi a confronto con i vecchi.* Committee on Radioactive Waste Management (2006).

191 *Le riserve mondiali di litio sono stimate per 9.5 milioni di tonnellate.* Le fonti principali di litio sono state scoperte in Bolivia (56.6%), Cile (31.4%) e USA (4.3%). www.dnpm.gov.br

– *Esiste un'altra fonte di litio: l'acqua del mare...* Sono state studiate diverse tecniche di estrazione (Steinberg and Dang, 1975; Tsuruta, 2005; Chitrakar et al., 2001).

– *L'energia da fusione grazie alle riserve di litio.*
La densità di energia nel litio naturale ammonta a circa 7500 kWh per grammo (Ongena and Van Oost, 2006). Ci sono notevoli differenze tra le stime di quanto efficientemente i reattori a fusione sarebbero in grado di trasformare questo in energia elettrica. Tali stime vanno dai 310 kWh(e)/g (Eckhartt, 1995) ai 3400 kWh(e)/g di litio naturale (Steinberg and Dang, 1975).). Ho assunto 2300 kWh(e)/g sulla base di questa cifra sommaria ampiamente citata: "Un impianto a fusione nucleare da 1 GW utilizzerà circa 100 kg di deuterio e 3 tonnellate di litio naturale all'anno, generando circa 7 miliardi di kWh". [69vt8r], [6oby22], [63l2lp].

Per saperne di più sulla fissione: Hodgson (1999), Nuttall (2004), Rogner (2000), Williams (2000). Uranium Information Center – www.uic.com.au. www.world-nuclear.org, [wnchw].
Sui costi: Zaleski (2005).
Sui depositi di scorie: [shrln].
Sui reattori autofertilizzanti ed il torio: www.energyfromthorium.com.

Per saperne di più sulla fusione: www.fusion.org.uk, www.askmar.com/Fusion.html.

25 *Vivere grazie alle rinnovabili di altri Paesi?*

Che il Mediterraneo divenga una zona di cooperazione o di scontro, nel 21° secolo sarà comunque di importanza strategica per la nostra sicurezza comune.

Joschka Fischer, Ministro degli Esteri tedesco, Febbraio 2004

Abbiamo scoperto quanto sia difficile fare a meno dei combustibili fossili, vivendo grazie alle nostre fonti energetiche rinnovabili. Il nucleare ha i suoi problemi. Quindi, che cosa possiamo fare? E se vivessimo grazie alle energie rinnovabili di qualcun altro? (Non è che possiamo arrogarci il diritto di usufrutto delle energie rinnovabili di altri, certo, ma forse qualcuno potrebbe essere interessato a vendercele).

La maggior parte delle risorse per vivere in modo sostenibile sono legate alla superficie territoriale: se si desidera utilizzare i pannelli solari, occorre terra su cui metterli, se si vuole far crescere i raccolti, è di nuovo necessario avere della terra. Jared Diamond, nel suo libro *Collasso*, osserva che, mentre molti fattori diversi contribuiscono al crollo di una civiltà, una caratteristica comune a tutti i crolli è che la densità di popolazione umana è divenuta troppo grande.

Luoghi come la Gran Bretagna e l'Europa sono nei pasticci, perché hanno alte densità di popolazione, mentre tutte le fonti rinnovabili comportano installazioni diffuse – hanno bassa densità di potenza (tabella 25.1). Se si cerca un aiuto, si dovrebbe chiedere a Paesi che hanno tre cose: *a*) bassa densità di popolazione; *b*) grande superficie; *c*) una fonte rinnovabile con densità di potenza elevata.

Potenza per unità di superficie di terra o di acqua	
Eolico	2 W/m^2
Eolico offshore	3 W/m^2
Bacini per maree	3 W/m^2
Impianto a flusso di marea	6 W/m^2
Pannelli solari FV	5–20 W/m^2
Piante	0.5 W/m^2
Acqua pluviale (Highlands)	0.24 W/m^2
Centrale idroelettrica	11 W/m^2
Camino solare	0.1 W/m^2
Concentratore solare (deserto)	**15** W/m^2

Tabella 25.1. Gli impianti rinnovabili devono avere le dimensioni di Paesi, dato che tutte le rinnovabili comportano installazioni "disseminate".

Regione	Popolazione	Area (km^2)	Densità (persone per km^2)	Area per persona (m^2)
Libia	5 760 000	1 750 000	3	305 000
Kazakistan	15 100 000	2 710 000	6	178 000
Arabia Saudita	26 400 000	1 960 000	13	74 200
Algeria	32 500 000	2 380 000	14	73 200
Sudan	40 100 000	2 500 000	16	62 300
Mondo	6 440 000 000	148 000 000	43	23 100
Scozia	5 050 000	78 700	64	15 500
Unione Europea	496 000 000	4 330 000	115	8 720
Galles	2 910 000	20 700	140	7 110
Regno Unito	59 500 000	244 000	243	4 110
Inghilterra	49 600 000	130 000	380	2 630

Tabella 25.2. Alcune regioni, ordinate per densità di popolazione crescente. Si veda p. 379 per ulteriori densità di popolazione.

La Tabella 25.2 evidenzia alcuni Paesi che fanno al caso nostro. La densità di popolazione della Libia, per esempio, è 70 volte più piccola di

quella della Gran Bretagna e la sua area è 7 volte più grande. Altri grandi Paesi, ricchi di superficie, sono il Kazakistan, l'Arabia Saudita, l'Algeria, e il Sudan.

In tutti questi Paesi, ritengo che tra le rinnovabili quella più promettente sia l'energia solare, in particolare il *solare a concentrazione*, che utilizza specchi o lenti per concentrare la luce del sole. Le centrali solari a concentrazione sono disponibili in diversi varianti, gli specchi in movimento possono essere organizzati in varie geometrie ed esistono varie tecnologie di conversione della potenza utilizzando il calore – motori Stirling, acqua pressurizzata o sali fusi, per esempio – ma tutte offrono potenze medie per unità di superficie abbastanza simili, intorno ai 15 W/m^2.

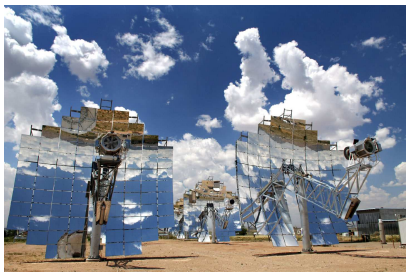


Figura 25.3. Motore Stirling piatto. Questi bei concentratori erogano una potenza per unità di superficie di terra pari a 14 W/m^2. Foto per gentile concessione della Stirling Energy Systems. `www.stirlingenergy.com`

Una tecnologia con la quale i conti tornano

"Tutta la potenza del mondo potrebbe essere fornita da un quadrato di 100 km per 100 km nel Sahara". È vero? Concentrare l'energia solare nei deserti comporta l'erogazione di una potenza media per unità di superficie pari a circa 15 W/m^2. Pertanto, impiegando uno spazio pari all'area del quadrato di cui sopra, la potenza erogata sarebbe 150 GW. Questo *non* uguaglia l'attuale consumo mondiale. Non è nemmeno vicino al consumo di *elettricità* nel mondo di oggi, che è di 2000 GW. I consumi mondiali, tenuto conto di tutte le fonti di energia, ammontano oggigiorno a 15 000 GW. Dunque l'affermazione corretta circa l'erogazione di potenza dal Sahara è che gli attuali consumi potrebbero essere forniti da un quadrato di *1000 km per 1000 km* nel deserto, completamente riempito di solare a concentrazione. Questo è quattro volte l'area del Regno Unito. E se siamo interessati a vivere in un mondo equo, dovremmo presumibilmente porci l'obiettivo di fornire qualcosa di più degli *attuali* consumi. Per rifornire ogni persona al mondo con un consumo energetico di una media europea (125 kWh/gg), la superficie necessaria sarebbe pari a *due* "piazze" quadrate nel deserto di 1000 km per lato.

Fortunatamente, il Sahara non è l'unico deserto, quindi forse è il caso spezzettare il mondo in regioni più piccole e chiedersi quale settore di deserto locale sia necessario per ogni regione. Pertanto, concentrandosi sull'Europa: "Qual è l'area del Sahara del Nord richiesta per fornire *tutti in Europa e Nord Africa* con un consumo energetico di una media europea? Prendendo la popolazione di Europa e Nord Africa pari a 1 miliardo, l'area necessaria scende a 340 000 km^2, che corrisponde ad un quadrato **600 km per 600 km**. Quest'area equivale ad una Germania, 1.4 Regni Uniti o **16 Galles**.

La quota di questo settore grande 16-Galles spettante al Regno Unito sarebbe un Galles: un quadrato di 145 km per 145 km nel Sahara fornirebbe gli attuali consumi di energia primaria del Regno Unito. Queste "piazze" sono mostrate in figura 25.5. Si noti che, mentre il quadrato gial-

Figura 25.4. Andasol – una centrale solare da 100 MW in costruzione in Spagna. L'eccesso di energia termica prodotta durante il giorno sarà stoccato in vasche di sali allo stato liquido per un massimo di sette ore, permettendo una fornitura continua e stabile di energia elettrica alla rete. La centrale è prevista produrre 350 GWh all'anno (40 MW). Gli specchi parabolici occupano 400 ettari, per cui la potenza per unità di superficie sarà di 10 W/m^2.
Foto sopra: ABB. Foto sotto: IEA SolarPACES.

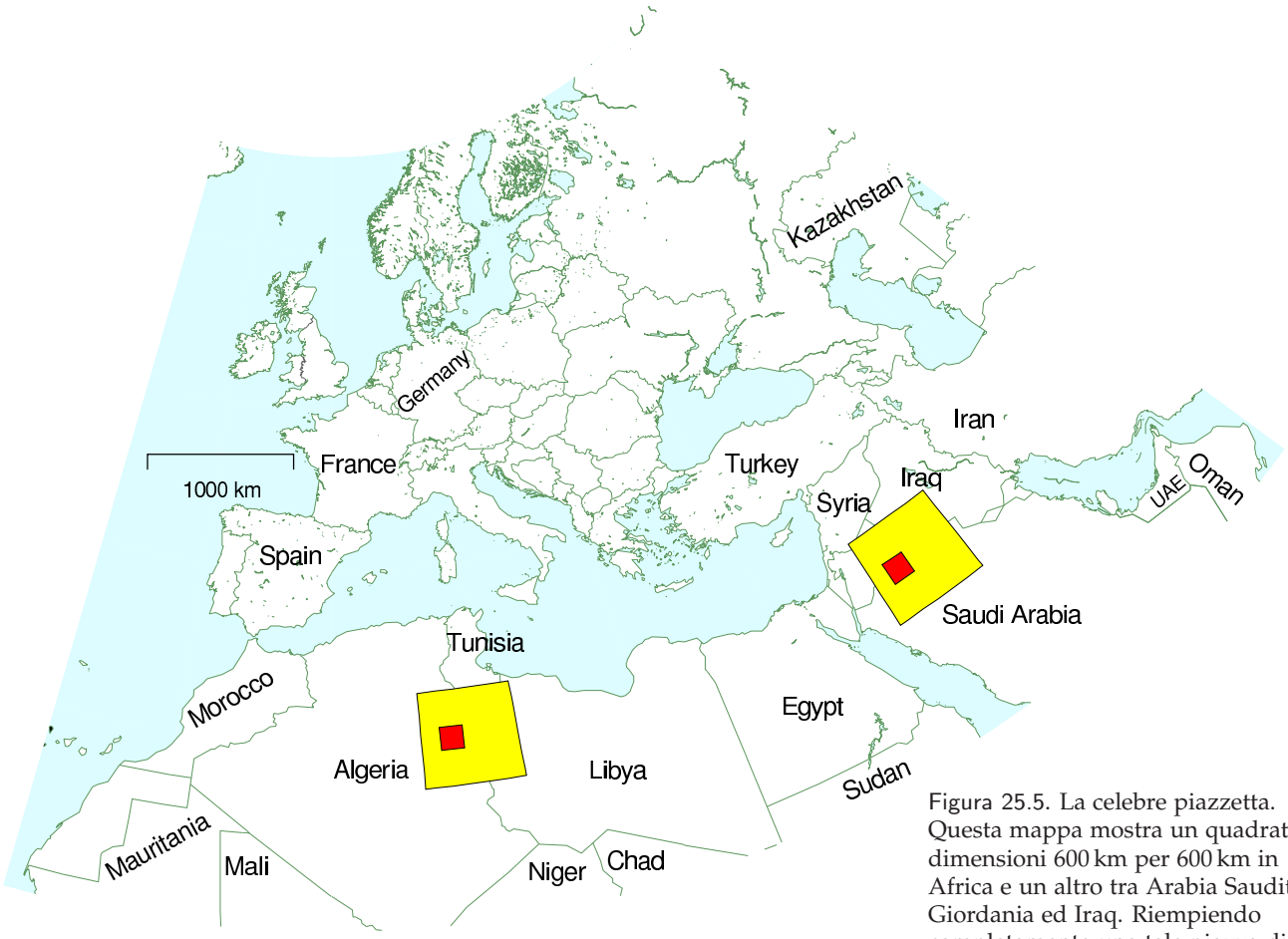


Figura 25.5. La celebre piazzetta. Questa mappa mostra un quadrato di dimensioni 600 km per 600 km in Africa e un altro tra Arabia Saudita, Giordania ed Iraq. Riempiendo completamente una tale piazza di impianti a concentrazione solare si otterrebbe una fornitura di energia sufficiente per permettere ad 1 miliardo di persone il consumo di 125 kWh/gg, ossia quello di un europeo medio. L'area di uno di questi quadrati è la stessa della Germania e 16 volte quella del Galles. All'interno di ogni grande piazza si trova un piccolo settore quadrato di 145 km per 145 km che mostra la superficie del Sahara – un Galles – necessaria per la fornitura di tutti i consumi energetici britannici.

lo può sembrare "piccolo" in confronto all'Africa intera, in effetti occupa una superficie pari a quella della Germania.

Il piano DESERTEC

Un'organizzazione che si chiama DESERTEC [`www.desertec.org`] sta promuovendo un piano per l'utilizzo del solare a concentrazione negli assolati Paesi del Mediterraneo con linee di trasmissione dell'alta tensione a corrente continua (HVDC) [si è scelto l'acronimo inglese – High Voltage Direct Current – perché di uso comune. (N.d.T.)] (Figura 25.7) che consegnino l'energia alle ben più nuvolose Regioni Settentrionali. La tecnologia HVDC è in uso dal 1954 per la trasmissione di potenza, sia attraverso linee aeree che attraverso cavi sottomarini (come l'interconnessione tra Francia e Inghilterra). È già stata utilizzata per la trasmissione di energia elettrica su distanze di oltre 1000 km in Sud Africa, Cina, America, Canada, Brasile

Paese	Potenziale economico (TWh/anno)	Potenziale costiero (TWh/anno)
Algeria	169 000	60
Libia	140 000	500
Arabia Saudita	125 000	2 000
Egitto	74 000	500
Iraq	29 000	60
Marocco	20 000	300
Oman	19 000	500
Siria	10 000	0
Tunisia	9 200	350
Giordania	6 400	0
Yemen	5 100	390
Israele	3 100	1
EAU	2 000	540
Kuwait	1 500	130
Spagna	1 300	70
Qatar	800	320
Portogallo	140	7
Turchia	130	12
Totale	620 000 (70 000 GW)	6 000 (650 GW)

Tabella 25.6. Il potenziale del solare nei Paesi intorno e vicino all'Europa. Il "potenziale economico" è la potenza che potrebbe essere generata in luoghi adatti dove l'irraggiamento diretto supera normalmente i 2000 kWh/m^2/anno.
Il "potenziale costiero" è la potenza che potrebbe essere generata entro i primi 20 m (in verticale) dal livello del mare; tale potenza è particolarmente promettente a causa della possibile combinazione con la desalinizzazione.
Per confronto, la potenza totale richiesta per rifornire con 125 kWh al giorno 1 miliardo di persone è 46 000 TWh/anno (5 200 GW).
6000 TWh/anno (650 GW) equivale a 16 kWh al giorno a persona per 1 miliardo di persone.

e Congo. Una tipica linea da 500 kV può trasmettere una potenza di 2 GW. Una coppia di linee HVDC in Brasile trasmette 6.3 GW.

L'HVDC è preferito alle linee AC [i.e. a corrente alternata. (N.d.T.)] tradizionali dell'alta tensione, perché sono necessarie meno apparecchiature fisiche, parti meccaniche e superficie e perché le perdite di potenza nell'HVDC sono inferiori. Le perdite di potenza su di una linea HVDC lunga 3500 km, comprese quelle per la conversione da AC a DC e viceversa, ammonterebbero a circa il 15%. Un ulteriore vantaggio dei sistemi HVDC è che aiutano a stabilizzare le reti elettriche alle quali sono connesse.

Nei piani della DESERTEC, le principali aree di sfruttamento sono zone costiere, in quanto le centrali elettriche a concentrazione solare trovandosi vicino al mare sarebbero in grado di fornire acqua desalinizzata come sottoprodotto – prezioso per i bisogni umani in generale e per l'agricoltura in particolare.

La Tabella 25.6 mostra le stime della DESERTEC per la potenza che potrebbe essere eventualmente prodotta in vari Paesi dell'Europa e del Nord Africa. Il "potenziale economico" equivale ad una fornitura di 125 kWh al giorno per 1 miliardo di persone. Il totale del "potenziale costiero" è sufficiente ad alimentare con 16 kWh al giorno per persona 1 miliardo di persone.

Figura 25.7. Posa di un collegamento in corrente continua ad alta tensione tra la Finlandia e l'Estonia. Una coppia di questi cavi trasmette una potenza di 350 MW. Foto: ABB.

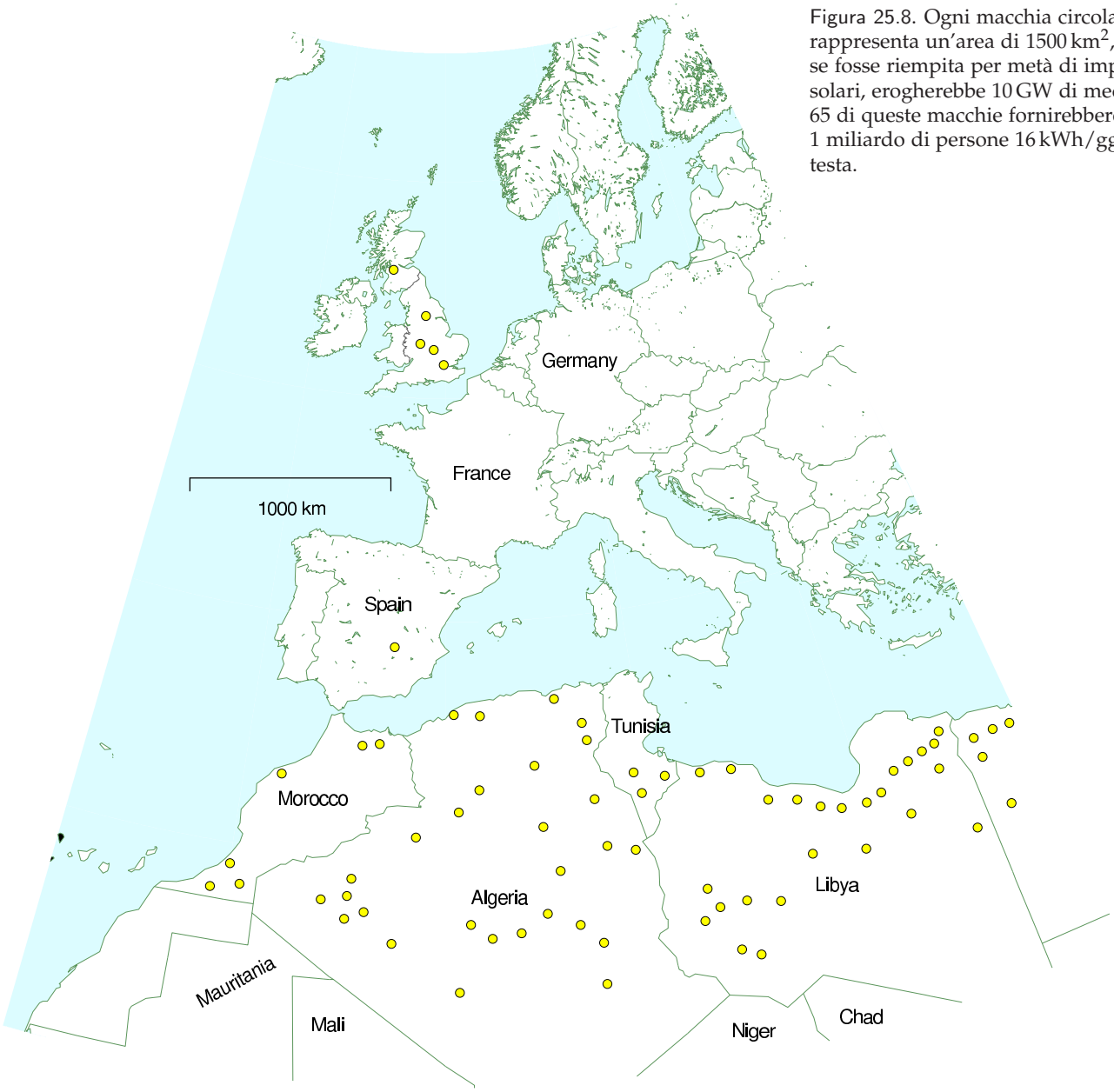


Figura 25.8. Ogni macchia circolare rappresenta un'area di 1500 km^2, che, se fosse riempita per metà di impianti solari, erogherebbe 10 GW di media. 65 di queste macchie fornirebbero ad 1 miliardo di persone 16 kWh/gg a testa.

Cerchiamo di trasmettere su di una cartina come potrebbe apparire un piano realistico. Immaginate di costruire una serie di impianti solari ciascuno con una superficie di 1500 km^2 – grosso modo le dimensioni di Londra. (Greater London ha una superficie di1580 km^2; l'autostrada M25 che orbita intorno a Londra racchiude un'area 2300 km^2). Chiamiamo questi impianti "*macchie*". Immaginate che in ciascuna di queste macchie la metà della superficie sia dedicata a centrali elettriche a concentrazione solare con una densità media di potenza pari a 15 W/m^2, lasciando spazio intorno per agricoltura, edifici, ferrovie, strade, condutture e cavi. Tenendo conto di una perdita di trasmissione del 10% tra la "chiazza" ed il consumatore, ognuna di queste genera una potenza media di 10 GW. La Figura 25.8 mostra alcune macchie in scala su di una mappa. Per dare un'idea della scala ne ho lasciate cadere alcune anche sulla Gran Bretagna. *Quattro* di queste macchie avrebbero una potenza pari a circa il consumo totale di elettricità della Gran Bretagna (16 kWh/gg a persona per 60 milioni di persone). *Sessantacinque* macchie fornirebbero ad 1 miliardo di abitanti, in tutto tra Europa e Nord Africa, 16 kWh/gg a persona. La Figura 25.8 mostra 68 macchie nel deserto.

Figura 25.9. Un collettore fotovoltaico a concentrazione da 25 kW (picco) prodotto dalla società californiana Amonix. Su di un'apertura di 225 m^2 sono contenute 5760 lenti di Fresnel, concentrazione ottica $\times 260$, ciascuna delle quali illumina una cella al silicio 25%-efficiente. Uno di questi collettori, posto in un luogo deserto appropriato, produce 138 kWh al giorno – abbastanza per coprire i consumi energetici di mezzo americano. Si noti l'uomo che funge da scala di riferimento. Foto di David Faiman.

Fotovoltaico a concentrazione

Un' alternativa al solare termico a concentrazione nei deserti sono i sistemi fotovoltaici a concentrazione su larga scala. Per fabbricarli, si piazzano delle celle solari di alta qualità, che producono energia elettrica, nel fuoco di lenti a buon mercato o specchi. Faiman et al. (2007) affermano che "il solare, nella sua varietà di concentratore fotovoltaico, può avere costi assolutamente competitivi con quelli dei combustibili fossili [in Stati che hanno un deserto come la California, l'Arizona, il Nuovo Messico e il Texas. (N.d.A.)] senza la necessità di alcun tipo di sovvenzione".

Secondo i produttori di Amonix, questa forma di solare a concentrazione avrebbe una potenza media per unità di superficie pari a 18 W/m^2.

Un modo per avere un'idea delle apparecchiature fisiche necessarie allo scopo è quello di personalizzare. Uno dei collettori da 25 kW (di picco) mostrati in figura 25.9 genera in media circa 138 kWh al giorno; lo stile di vita americano utilizza attualmente 250 kWh al giorno per persona. Dunque, per ottenere che gli Stati Uniti rinuncino ai combustibili fossili grazie all'energia solare, occorrono circa due di questi collettori da 15 m $\times$ 15 m a persona.

Domande

Sono confuso! Nel Capitolo 6, si è detto che i migliori pannelli fotovoltaici erogano 20 W/m^2 di media, in un posto che abbia una "solarità tipicamente britannica". Presumibilmente nel deserto gli stessi pannelli eroghe-

rebbero 40 W/m^2. Dunque com'è possibile che le centrali a concentrazione forniscano solo 15–20 W/m^2?

Sicuramente il fatto di usare concentratori di potenza dovrebbe fornire un servizio migliore di semplici pannelli piatti, o no? Bella domanda. La risposta breve è no. Concentrando l'energia solare non si ottiene un aumento della potenza per unità di superficie di pannelli piani. Il dispositivo concentratore deve seguire il sole, altrimenti la luce del sole non viene concentrata proprio; per cui, una volta avviato il confezionamento del territorio con congegni per l'inseguimento del sole, è necessario lasciare degli spazi vuoti tra l'uno e l'altro, e un sacco di luce va persa cadendo attraverso queste lacune. La ragione per cui nonostante questo le persone fabbricano sistemi di concentrazione dell'energia solare è che, oggi come oggi, i pannelli fotovoltaici piatti sono molto costosi, mentre i sistemi a concentrazione sono più economici. L'obiettivo del popolo dei concertatori non è quello di fabbricare sistemi di grande potenza per unità di superficie di territorio. La superficie è a buon mercato (essi assumono). L'obiettivo è quello di fornire grande potenza per ogni dollaro.

***Ma se i pannelli piani hanno maggiore densità di potenza, perché semplicemente non hai previsto di coprire il deserto del Sahara con* questi?**

Perché qui si sta cercando di discutere le opzioni pratiche per la produzione sostenibile di energia su larga scala per l'Europa e il Nord Africa entro il 2050. La mia ipotesi è che da qui al 2050 gli specchi saranno sempre e comunque più convenienti dei pannelli fotovoltaici, quindi il solare a concentrazione è la tecnologia su cui dovremmo concentrarci.

Che dire dei camini solari?

Un camino solare o torre solare a corrente ascensionale utilizza l'energia dell'irraggiamento solare in modo molto semplice. Un enorme camino viene costruito al centro di una zona coperta da una volta trasparente in vetro o plastica; dato che l'aria calda tende a salire, una volta creatasi in questa specie di serra che funge da collettore di calore, essa sibila su per il camino, tirando dentro nuova aria fredda che si introduce attraverso il perimetro del collettore di calore. La potenza viene estratta dal flusso d'aria per mezzo di turbine poste alla base del camino. I camini solari sono abbastanza semplici da costruire, ma non erogano una potenza impressionante per unità di superficie. Un impianto pilota a Manzanares, Spagna ha operato per sette anni tra il 1982 e il 1989. Il camino aveva un'altezza di 195 m e un diametro di 10 m; il collettore aveva un diametro di 240 m e la volta era costituita da 6000 m^2 di vetro e 40 000 m^2 di plastica trasparente. Questo ha generato 44 MWh all'anno, il che corrisponde ad una potenza per unità di superficie pari a 0.1 W/m^2. Teoricamente, più grande è il collettore e più alto è il camino, più grande è la densità di potenza del camino solare. Gli ingegneri che hanno lavorato a Manzanares ritengono che, in un sito con un irraggiamento solare di 2300 kWh/m^2 all'anno (262 W/m^2),

Figura 25.10. Il prototipo di camino solare costruito a Manzanares. Foto dal sito `solarmillennium.de`.

una torre alta 1000 m, circondata da un collettore di 7 km di diametro potrebbe generare 680 GWh all'anno, una potenza media di 78 MW. Questo significa una potenza per unità di superficie di circa 1.6 W/m^2, che è simile alla potenza per unità di superficie dei parchi eolici in Gran Bretagna e un decimo di quella che si è visto consegnerebbero le centrali solari a concentrazione. Si sostiene che i camini solari potrebbero generare elettricità a un prezzo simile a quello delle centrali convenzionali. Suggerisco che i Paesi che hanno abbastanza terra e sole di scorta [insomma, "da vendere". (N.d.T.)] ospitino un grande concorso, tipo gara di cucina, tra i camini solari e il solare a concentrazione, e che questo venga finanziato dai produttori di petrolio e dai Paesi che lo consumano.

E se ottenessimo energia dall'Islanda, dove l'energia geotermica ed idroelettrica sono così abbondanti?

In effetti, l'Islanda esporta già energia in modo efficace alimentando le industrie che forniscono prodotti ad alta intensità energetica. L'Islanda produce quasi una tonnellata di alluminio per cittadino all'anno, per esempio! Pertanto, dal punto di vista dell'Islanda, ci sono in ballo grandi profitti. Ma può l'Islanda salvare l'Europa? Sarei sorpreso se la produzione di energia dell'Islanda si ridimensionasse su grande scala fino a divenire abbastanza grande da permettersi ingenti esportazioni di energia elettrica, anche solo verso la Gran Bretagna. Come valore di riferimento, facciamo un confronto con l'interconnessione Inghilterra–Francia, in grado di erogare fino a 2 GW attraverso la Manica. Tale potenza massima è pari a 0.8 kWh al giorno per persona nel Regno Unito, circa il 5% del consumo medio britannico di energia elettrica. La produzione media di energia elettrica geotermica dell'Islanda è solo 0.3 GW, ossia meno dell'1% del consumo medio di energia elettrica della Gran Bretagna. La produzione media di energia elettrica in Islanda è di 1.1 GW. Dunque, per creare un collegamento che invii una potenza pari alla capacità del dispositivo di interconnessione francese, l'Islanda dovrebbe *triplicare* la propria produzione di energia elettrica. Per fornirci 4 kWh al giorno per persona (grosso modo ciò che la Gran Bretagna ottiene dalle proprie centrali nucleari), la produzione di energia elettrica islandese dovrebbe aumentare di *dieci volte*. Probabilmente è una buona idea quella di costruire interconnessioni con l'Islanda, ma non aspettatevi che questo ci fornisca qualcosa di più di un piccolo contributo.

Figura 25.11. Più geotermia in Islanda. Foto di Rosie Ward.

Note ed approfondimenti

p.

197 *Il solare a concentrazione nei deserti eroga una potenza media per unità di superficie di circa 15 W/m^2.* Le mie fonti per questo numero sono due aziende che fanno concentrare l'energia solare nei deserti. `www.stirlingenergy.com` dice che uno dei sui specchi piatti da 25 kW con un motore Stirling posizionato

sul fuoco [del sistema ottico. (N.d.T.)] è in grado di generare 60 000 kWh all'anno in una postazione favorevole nel deserto. Il tutto potrebbe essere impacchettato con una concentrazione di un piatto ogni 500 m^2. Il che significa una potenza media di 14 W/m^2. Si asserisce che i piatti solari Stirling facciano il miglior uso possibile del territorio, in termini di energia erogata.

`www.ausra.com` usa specchi piani per scaldare l'acqua a 285 °C e guidare una turbina a vapore. L'acqua riscaldata e pressurizzata può essere immagazzinata in profonde caverne rivestite di metallo in modo da consentire la produzione di energia di notte. Nel descrivere un impianto da 240 MW(e)proposto per l'Australia (Mills and Lièvre, 2004), i progettisti affermano che 3.5 km^2 di specchi fornirebbero 1.2 TWh(e); il che significa 38 W/m^2 di specchio. Per trovare la potenza per unità di superficie di territorio, dobbiamo tener conto dello spazio vuoto tra gli specchi. Quelli di Ausra sostengono che a loro basti un quadrato di deserto, 153 km per 153 km, per fornire tutta la potenza elettrica degli Stati Uniti (Mills and Morgan, 2008). L'elettricità totale made in USA ammonta a 3600 TWh/anno, sicché costoro rivendicano una potenza per unità di superficie di territorio pari a 18 W/m^2. Questa tecnologia va sotto il nome di *riflettore fresnel lineare compatto* (Mills and Morrison, 2000; Mills et al., 2004; Mills and Morgan, 2008). Tra l'altro, piuttosto che "solare a concentrazione", la società Ausra preferisce usare il termine *solare termoelettrico* (STE), dando risalto ai vantaggi dell'accumulo termico, in contrasto con il fotovoltaico a concentrazione, che non è dotato di una opzione per lo stoccaggio naturale.

Figura 25.12. Due ingegneri che montano una centrale elettrica a concentrazione solare della eSolar utilizzando eliostati (specchi che ruotano puntando il sole). `esolar.com` costruisce centrali elettriche di medie dimensioni: impianti da 33 MW (picco) su 64 ettari. Questo significa 51 W/m^2 di picco, per cui tirando ad indovinare si può dire che in una tipica postazione nel deserto fornirebbero circa un quarto di questo valore: 13 W/m^2.

Trieb and Knies (2004), forti sostenitori del solare a concentrazione, fanno una proiezione riguardo alle alternative tecnologiche del solare a concentrazione riportando le seguenti gamme di potenza per unità di superficie: specchi parabolici, 14–19 W/m^2; collettori fresnel lineari, 19–28 W/m^2; torre con eliostati, 9–14 W/m^2; piatto stirling, 9–14 W/m^2.

Esistono in Europa tre impianti dimostrativi per il solare a concentrazione. Andasol – che utilizza specchi parabolici; Solúcar PS10, una torre nei pressi di Siviglia; e Solartres, una torre che impiega i sali fusi per l'immagazzinamento del calore. Il sistema a specchi parabolici concavi Andasol mostrato in figura 25.4 4 è previsto fornire 10 W/m^2. La torre solare da 11 MW di Solúcar ha 624 specchi, ognuno da 121 m^2. Gli specchi concentrano la luce solare con una densità di radiazioni fino a 650 kW/m^2. Il ricevitore riceve una potenza di picco pari a 55 MW. La centrale può immagazzinare 20 MWh di energia termica; in questo modo si può andare avanti per 50 minuti in caso di nuvolosità. Ci si aspettava di generare 24.2 GWh di elettricità all'anno occupando 55 ettari, il che significa una potenza media per unità di superficie di 5 W/m^2. (Fonte: Abengoa Annual Report 2003.) Solartres occuperà 142 ettari ed è attesa produrre 96.4 GWh all'anno; il che significa una densità di potenza di 8 W/m^2. Sia Andasol che Solartres impiegheranno un certo quantitativo di gas naturale durante il normale funzionamento.

Figura 25.13. Un sistema di alimentazione ad alta tensione in corrente continua, in Cina. Foto: ABB.

199 *L'HVDC è già utilizzato per la trasmissione di energia elettrica su distanze di oltre 1000 km in Sud Africa, Cina, America, Canada, Brasile e Congo.* Fonti: Asplund (2004), Bahrman and Johnson (2007). Per saperne di più sulll'HVDC: Carlsson (2002).

199 *Le perdite su di una linea HVDC lunga 3500 km, comprese quelle per la conversione da AC a DC e viceversa, ammonterebbero a circa il 15%.* Fonti: Trieb and Knies (2004); van Voorthuysen (2008).

201 *Secondo Amonix, il fotovoltaico a concentrazione avrebbe una potenza media per unità di superficie di 18 W/m^2.* I presupposti di `www.amonix.com` sono: la lente trasmette l'85% della luce solare; l'efficienza della cella è pari al 32%, quella del collettore 25% ed ulteriori perdite dovute ad ombreggiamento ammontano al 10%. Il rapporto apertura/terreno è di 1/3. Irraggiamento diretto di norma: 2222 kWh/m^2/anno. Essi si aspettano che ogni kW di capacità di picco eroghi 2000 kWh/anno (una media di 0.23 kW). Un impianto da 1 GW di capacità di picco occuperebbe 12 km^2 di territorio e consegnerebbe 2000 GWh all'anno. Da cui 18 W/m^2.

202 *Camini solari.* Fonti: Schlaich J (2001); Schlaich et al. (2005); Dennis (2006), `www.enviromission.com.au`, `www.solarairpower.com`.

203 *La produzione media di energia elettrica geotermica dell'Islandaè appena 0.3 GW. La produzione media di elettricità dell'Islanda ammonta a 1.1 GW.* Ecco le statistiche del 2006: 7.3 TWh di idrolettricità, 2.6 TWh di elettricità da geotermia, con capacità di 1.16 GW e 0.42 GW, rispettivamente. Fonte: Orkustofnun National Energy Authority [`www.os.is/page/energystatistics`].

Ulteriori letture consigliate: European Commission (2007), German Aerospace Center (DLR) Institute of Technical Thermodynamics Section Systems Analysis and Technology Assessment (2006), `www.solarmillennium.de`.

26 Fluttuazioni e stoccaggio

Il vento, come forza motrice diretta, è del tutto inapplicabile ad un sistema di produzione meccanizzato, perché durante un perido di calma l'intera attività del paese si ritroverebbe bloccata. Prima dell'era delle macchine a vapore, ci sono stati tentativi di utilizzo dei mulini a vento per pompare l'acqua via dalle miniere, e anche se erano macchine potenti, funzionavano, però, in maniera intermittente, tanto che, durante un lungo periodo di calma piatta, rimasero allagate e i minatori furono senza lavoro per un po'.

William Stanley Jevons, 1865

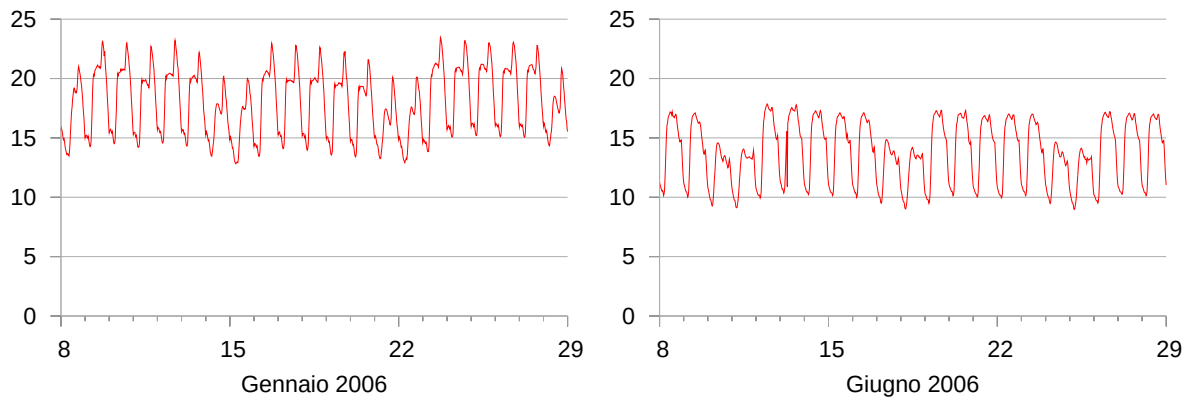


Figura 26.1. Richiesta di energia elettrica in Gran Bretagna (in kWh/giorno per persona) durante due settimane invernali e due settimane estive del 2006. I picchi in gennaio sono alle 18.00 di ogni giorno. La settimana lavorativa di cinque giorni è evidente in estate e in inverno. (Se voleste ottenere la domanda nazionale in GW, ricordatevi che in cima alla scala, 24 kWh/giorno per persona, sono equivalenti a 60 GW per l'intero Regno Unito).

Se tiriamo un calcio ai combustibili fossili e eliminiamo tutto il resto in favore delle rinnovabili, *oppure* del nucleare, *oppure* di un misto di entrambi, potremmo avere dei problemi. La maggior parte delle grandi fonti rinnovabili non sono spegnibili e accendibili a piacimento. Quando il vento soffia e c'è il sole, l'energia è li, pronta per essere sfruttata; ma può essere che due ore dopo non sia più disponibile. Nemmeno le centrali nucleari sono, normalmente, progettate per essere accese o spente. Esse sono, di norma, sempre attive, e la loro potenza erogata puù essere aumentata o diminuita solo su una scala temporale dell'ordine delle ore. Questo è un problema perché, in una rete elettrica, il consumo e la produzione devono essere esattamente bilanciate in ogni istante. La rete elettrica non può *immagazzinare* energia. Per avere un piano energetico in cui i conti tornino in ogni minuto di ogni giorno, abbiamo bisogno, pertanto, di *qualcosa di facilmente accendibile e spegnibile*. Si ritiene comunemente che questo qualcosa di facilmente accendibile e spegnibile debba essere una *fonte* di potenza che viene spenta e accesa per compensare le fluttuazioni di fornitura dell'energia relative alla domanda (per esempio una centrale

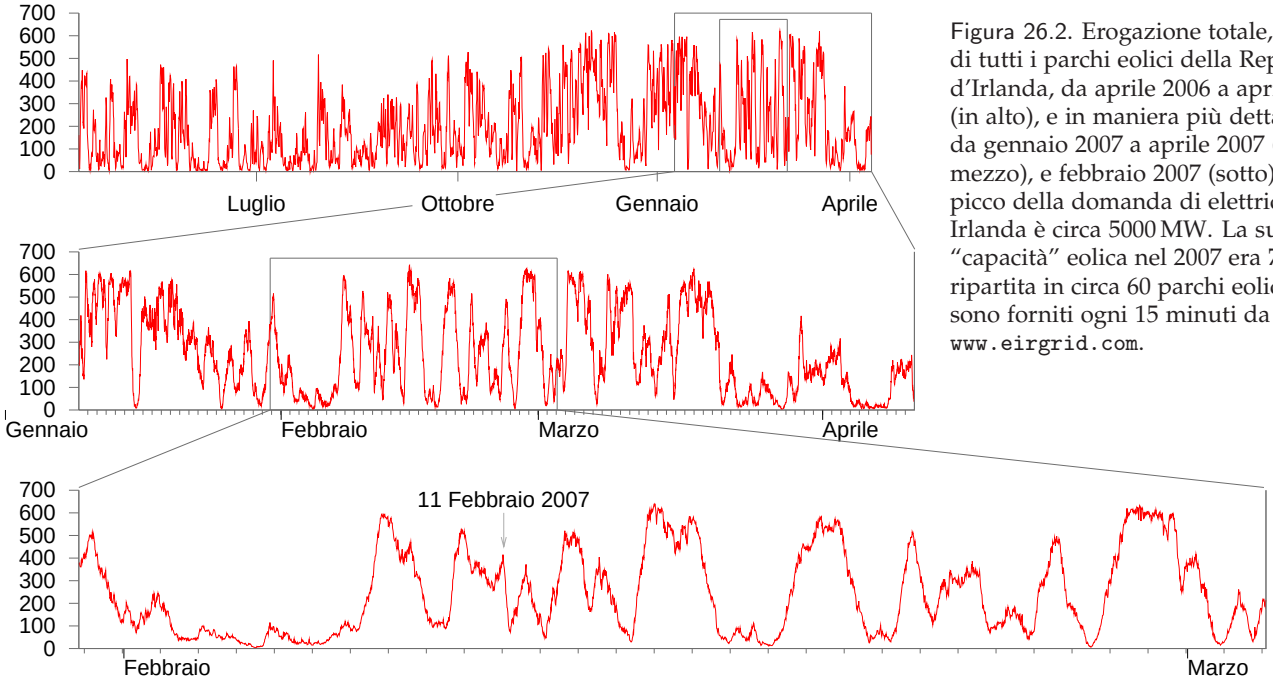


Figura 26.2. Erogazione totale, in MW, di tutti i parchi eolici della Repubblica d'Irlanda, da aprile 2006 a aprile 2007 (in alto), e in maniera più dettagliata da gennaio 2007 a aprile 2007 (nel mezzo), e febbraio 2007 (sotto). Il picco della domanda di elettricità in Irlanda è circa 5000 MW. La sua "capacità" eolica nel 2007 era 745 MW, ripartita in circa 60 parchi eolici. I dati sono forniti ogni 15 minuti da `www.eirgrid.com`.

a combustibile fossile!). Altrimenti un'altra maniera egualmente efficace per far corrispondere produzione e domanda sarebbe quella di avere una *utenza* facilmente spegnibile o accendibile – un pozzo di potenza che può essere facilmente acceso o spento con uno schiocco di dita. A prescindere da quale delle due strade si decida di percorrere, questo qualcosa di facilmente accendibile o spegnibile ha bisogno di essere un qualcosa di *grande* perché la domanda di elettricità varia molto (figura 26.1). La domanda a volte cambia significativamente in una scala temporale di qualche minuto. L'oggetto di questo capitolo è come far fronte alle fluttuazioni nella produzione e nella domanda, senza utilizzare combustibili fossili.

A quanto ammonta la fluttuazione delle energie rinnovabili?

Per quanto possiamo amare le fonti rinnovabili, non dobbiamo prenderci in giro sul fatto che il vento fluttua.

I critici dell'energia eolica dicono: "La potenza eolica è intermittente e imprevedibile, quindi essa non può contribuire alla sicurezza dell'approvvigionamento energetico; se generassimo molta potenza eolica, dovremmo anche mantenere molte centrali termoelettriche a combustibile fossile per rimpiazzare il vento quando esso cala drasticamente". Titoli, poi, come "La scomparsa del vento causa lo stato di emergenza nella rete elettrica in Texas" non fanno che rafforzare questo punto di vista. Chi supporta l'energia eolica minimizza questo problema: "Non preoccupatevi – i *sin-*

goli parchi eolici possono essere intermittenti, ma presi nell'insieme, come *somma* di tutti i parchi eolici in zone differenti, lo sono molto meno".

Diamo un'occhiata ai dati reali e cerchiamo di dedurne un punto di vista equilibrato. La Figura 26.2 mostra la produzione cumulata del parco di tutte le turbine eoliche della Repubblica d'Irlanda dal mese di aprile 2006 a quello di aprile 2007. Chiaramente il vento *è* intermittente, anche se considerassimo tutte le turbine eoliche del paese. La Gran Bretagna è un po' più grande dell'Irlanda, ma rimane lo stesso problema. Tra ottobre 2006 e febbraio 2007 ci sono stati diciassette giorni dove l'erogazione dei 1632 parchi eolici della Gran Bretagna è stata meno del 10% della loro potenza massima. Durante lo stesso periodo, ci sono stati cinque giorni in cui la produzione è stata meno del 5%, mentre per un giorno è stata solo del 2%.

Proviamo a quantificare le fluttuazioni dell'energia eolica su scala nazionale. I due problemi che si possono presentare sono le variazioni repentine e i lunghi periodi di calma. Cerchiamo il periodo di transizione più repentino guardando i dati sulla potenza eolica prodotta mese per mese in Irlanda. Il giorno 11 febbraio 2007, la potenza eolica irlandese diminuì da mezzanotte alle quattro del mattino, da 415 MW a 79 MW. Questo significa un tasso di variazione di 84 MW all'ora su una potenza totale a livello nazionale di 745 MW. (Per tasso di variazione intendo la velocità alla quale la potenza fornita sale o scende – ovvero la pendenza del grafico corrispondente al giorno 11 febbraio). OK: se proiettassimo questo dato nel caso della potenza eolica dell'Inghilterra che corrisponde a 33 GW (in modo che eroghi in media 10 GW), potremmo aspettarci di avere sporadici tassi di variazione di

$$84\,\mathrm{MW/h} \times \frac{33\,000\,\mathrm{MW}}{745\,\mathrm{MW}} = 3700\,\mathrm{MW/h},$$

nell'ipotesi che che la Gran Bretagna sia come l'Irlanda. Quindi, dobbiamo essere necessariamente capaci anche di *accendere* dei sostituti del vento ad un tasso di 3.7 GW all'ora – cioè l'equivalente di quattro centrali nucleari che partono da spente e arrivano a piena potenza ogni ora – *oppure* dobbiamo *staccare* la nostra *utenza*, senza preavviso, ad una velocità di 3.7 GW all'ora.

Queste richieste ventose possono essere soddisfatte? Nel rispondere a questa domanda avremo bisogno di parlare di più in termini di "gigawatt". I gigawatt sono delle grandi unità di misura che si usano quando si parla di una nazione. Sono per uno stato quello che per una persona sono i kilowattora al giorno: ovvero, una unità di misura conveniente. Il consumo di elettricità medio [quotidiano] della Gran Bretagna è di circa 40 GW. Possiamo mettere in relazione questo valore con quello del consumo personale: 1 kWh al giorno per persona è equivalente a 2.5 GW su scala nazionale. Quindi se ognuno di noi consuma 16 kWh al giorno di elettricità, il consumo nazionale diventa 40 GW.

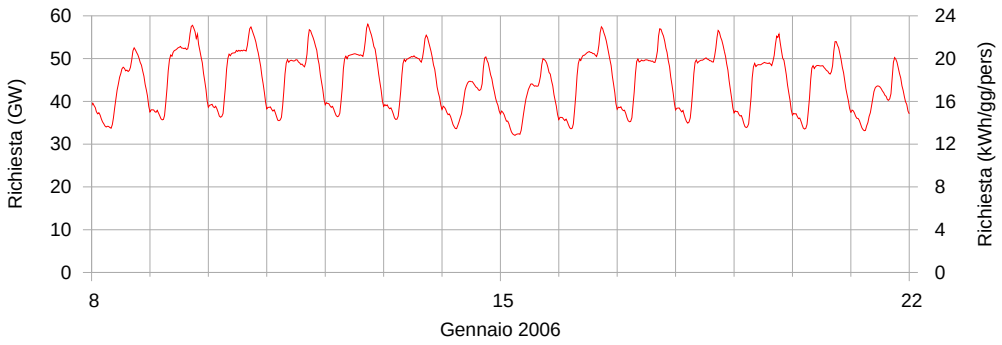


Figura 26.3. Rischiesta di elettricità in Gran Bretagna durante due settimane invernali del 2006. Le scale a sinistra e a destra mostrano la richiesta rispettivamente in unità di scala nazionale (GW) e in unità personali (kWh/giorno per persona). Sono gli stessi dati riportai nella Figura 26.1.

Un tasso di variazione di 4 GW all'ora è completamente al di fuori dell'esperienza umana? No. Ogni mattina tra le 6:30 e le 8:30, come mostra la figura 26.3, la domanda britannica di eletricità schizza in alto di circa 13 GW. Si tratta di un tasso di variazione di *6.5 GW all'ora*. Quindi, tutti i giorni, i nostri ingegneri energetici hanno a che fare sulla rete nazionale con tassi di variazione maggiori di 4 GW all'ora. Uno sporadico tasso extra di 4 GW all'ora indotto da cambiamenti repentini, non è un motivo per abbandonare l'idea di installare parchi eolici su scala nazionale. È un problema simile a quelli che gli ingegneri hanno già risolto. Semplicemente, abbiamo bisogno di trovare un modo per bilanciare in rete la domanda con una fornitura costantemente in mutamento senza ricorrere ai combustibili fossili. Non sto dicendo che il problema di fluttuazione del vento è *già* stato risolto – sto solo dicendo che è un problema dello stesso ordine di grandezza di altri problemi che sono già stati risolti.

OK, prima di iniziare a cercare delle soluzioni, dobbiamo ancora capire i numeri dell'altra criticità del vento: i lunghi periodi di calma. All'inizio del mese di febbraio del 2007, l'Irlanda ha avuto un periodo di calma su scala nazionale durato cinque giorni. Questo non è stato un evento raro, come potete vedere in figura 26.2. Periodi di calma della durata di due o tre giorni capitano spesso in un anno.

Esistono due modi per superarli. Possiamo, da un lato, immagazzinare l'energia da qualche parte prima, oppure, dall'altro, dotarci di un un modo per ridurre la domanda durante. (Va bene anche usare tutti e due i rimedi). Se abbiamo 33 GW di turbine eoliche eroganti una potenza media di 10 GW allora la quantità di energia che dobbiamo immagazzinare prima o che dobbiamo essere in grado di non consumare durante l'intero periodo di calma è

$$10\,\mathrm{GW} \times (5 \times 24\,\mathrm{h}) = 1200\,\mathrm{GWh}.$$

(Il gigawattora (GWh) è l'unità di misura più comoda per ragionamenti su scala nazionale. Il consumo elettrico britannico è approssimativamente 1000 GWh al giorno).

Per rendere comprensibile questa quantità, un magazzino per il paese di 1200 GWh è equivalente a una provvista energetica di 20 kWh a testa. Un tale deposito di energia permetterebbe alla nazione di trascorrere cinque giorni senza 10 GW di elettricità; o, in modo del tutto equivalente, permetterebbe a ogni individuo di vivere senza 4 kWh al giorno di elettricità per cinque giorni.

Far fronte ai periodi di calma e alle variazioni repentine

Dobbiamo risolvere due problemi – i periodi di calma (lunghi periodi con una bassa produzione da fonti rinnovabili), e le variazioni repentine (cambiamenti repentini di fornitura o domanda). Abbiamo quantificato questi problemi, assumendo che la Gran Bretagna avesse grossolanamente 33 GW di potenza eolica. Per far fronte ai periodi di pausa, dobbiamo essere capaci di stoccare a grandi linee 1200 GWh di energia (ovvero, 20 kWh per persona). Il tasso di variazione cui dobbiamo far fronte è 6.5 GW all'ora (ovvero, 0.1 kW all'ora per persona).

Esistono due soluzioni, che potrebbero risolvere questi problemi. La prima è una soluzione centralizzata mentre la seconda è decentralizzata. La prima soluzione immagazzina energia, poi fronteggia le fluttuazioni accendendo o spegnendo una *fonte* alimentata dall'accumulatore di energia. La seconda soluzione funziona, invece, accendendo o spegnando una parte della *domanda*.

La prima soluzione è l'*accumulo mediante pompaggio*. La seconda utilizza le batterie dei *veicoli elettrici* di cui abbiamo discusso nel capitolo 20. Prima di descrivere queste soluzioni, discutiamo qualche altra idea per fronteggiare i transitori repentini.

Altri modi di far fronte alle variazioni, dal lato della fornitura

Alcune delle rinnovabili si possono accendere o spegnere a seconda della richiesta. Se potessimo disporre di un'ingente quantità di potenza rinnovabile facilmente accendibile o spegnibile, tutti i problemi di questo capitolo sarebbero risolti. Nazioni come la Norvegia e la Svezia hanno grandi e importanti centrali idroelettriche che possono accendere e spegnere. Quali potrebbero essere le possibili opzioni per la Gran Bretagna?

Prima di tutto il Regno Unito potrebbe avere una grande quantità di inceneritori di rifiuti e biomasse – centrali che giocherebbero il ruolo giocato oggigiorno dalle centrali a combustibile fossile. Se queste installazioni fossero progettate per essere accese o spente a piacimento, ci sarebbero implicazioni di tipo economico, proprio come nel caso delle centrali a combustibile fossile che non sono in funzione in maniera continua: i loro generatori funzionerebbero in alcuni momenti al minimo e in altri al doppio della potenza; e molti generatori non sono molto efficienti se vengono

centrale	potenza (GW)	dislivello (m)	volume (milioni di m^3)	energia immagazzinata (GWh)
Ffestiniog	0.36	320–295	1.7	1.3
Cruachan	0.40	365–334	11.3	10
Foyers	0.30	178–172	13.6	6.3
Dinorwig	1.80	542–494	6.7	9.1

Tabella 26.4. Impianti di pompaggio in Gran Bretagna. La massima energia immagazzinabile nei sistemi attuali di stoccaggio è di circa 30 GWh.

accesi e spenti di continuo rispetto a quando sono tenuti accesi costantemente. Lasciando la questione dei costi da parte, la domanda da chiederci diventa quale sia la dimensione che queste risorse possono avere. Se venissero inceneriti tutti i rifiuti urbani e un'identica quantità di rifiuti agricoli, allora la potenza media ottenibile sarebbe circa 3 GW. Se costruiamo una capacità del valore *doppio* di questa potenza, ovvero inceneritori capaci di erogare 6 GW che rimangono accesi solo per la metà del tempo, questi sarebbero in grado di erogare 6 GW nei periodi di alta richiesta e zero nei periodi buchi. Queste centrali potrebbero essere progettate per accendersi o spegnersi nel giro di un'ora, potendo quindi far fronte a variazioni di 6 GW all'ora – ma solo per una variazione in positivo o negativo di 6 GW! Si tratta di un contributo interessante, ma non sufficiente, se vogliamo far fronte a fluttuazioni del vento di 33 GW.

E cosa dire a proposito dell'energia idroelettrica? Le centrali idroelettriche della Gran Bretagna hanno un fattore di utilizzo del 20%, quindi possono essere, potenzialmente, accese o spente. Inoltre, l'idroelettrico ha la caratteristica molto comoda di poter essere acceso o spento davvero velocemente. Glendoe, una nuova centrale idroelettrica con una capacità di 100 MW, sarà in grado di attivarsi in 30 secondi, per esempio. Si tratta di un tasso di variazione di 12 GW all'ora in una sola centrale! Quindi una serie sufficientemente ampia di centrali idroelettriche dovrebbero essere in grado di far fronte a variazioni introdotte da parchi eolici enormi. Comunque la capacità del parco idroelettrico britannico *non* è attualmente abbastanza grande per contribuire in maniera decisiva alla soluzione del nostro problema delle fluttuazioni (ipotizzando di voler far fronte a una rapida perdita tra 10 GW e 33 GW di potenza eolica). La capacità totale delle centrali idroelettriche tradizionali in Gran Bretagna è solo di circa 1.5 GW.

Quindi accendendo o spegnendo altre fonti rinnovabili di potenza non si risolverebbe il problema in Gran Bretagna. Abbiamo bisogno di altre soluzioni.

Stoccaggio mediante pompaggio

I sistemi di immagazzinamento mediante pompaggio utilizzano energia elettrica a basso costo per spostare l'acqua da un lago a valle a uno a monte;

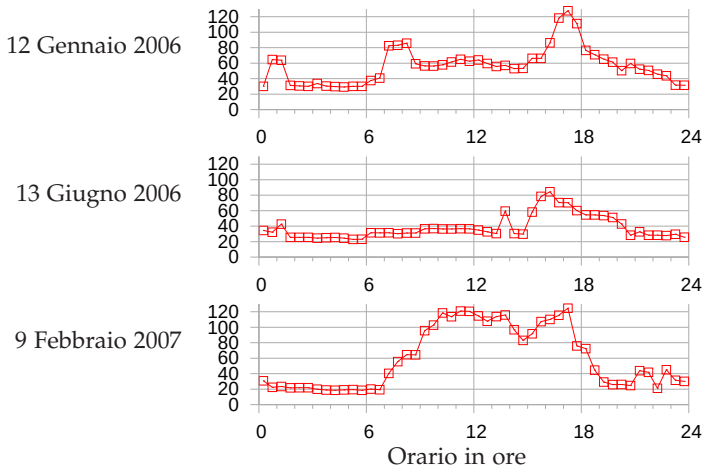


Figura 26.5. Come l'impianto di pompaggio si ripaga da solo. Prezzi dell'energia elettrica, in £ per MWh, di tre giorni nel 2006 e il 2007.

poi generano elettricità quando conviene, mediante turbine, proprio come nelle centrali idroelettriche.

La Gran Bretagna ha quattro impianti di pompaggio, i quali possono immagazzinare 30 GWh in totale (tabella 26.4, figura 26.6). Tipicamente sono utilizzate per stoccare l'energia elettrica prodotta in eccesso di notte, per poi restituirla durante il giorno, specialmente nei momenti di picco della domanda – un'attività economica molto profittevole, come mostra la figura 26.5. La centrale di Dinorwig – una stupefacente cattedrale all'interno di una montagna a Snowdonia – gioca anche il ruolo di una assicurazione: essa ha abbastanza grinta per riavviare la rete nazionale in caso di guasti importanti. Dinorwig può passare da 0 a 1.3 GW di potenza, in 12 secondi.

Dinorwig è la regina delle quattro centrali. Diamo un'occhiata alle sue caratteristiche vitali. L'energia totale che può essere accumulata a Dinorwig è di circa 9 GWh. Il suo lago di monte è circa 500 m sopra il sottostante, e il volume di acqua utile di 7 milioni di m^3 fluisce con una portata massima di 390 m^3/s, consentendo di erogare una potenza di 1.7 GW per 5 ore. L'efficienza di questo sistema di accumulo è del 75%.

Se tutte e quattro le centrali di accumulo mediante pompaggio venissero accese simultaneamente, produrrebbero una potenza di 2.8 GW. Esse possono accendersi in modo estremamente rapido, facendo fronte a ogni tipo di tasso di variazione che le fluttuazioni nella domanda o del vento potrebbero presentare. Comunque la capacità di 2.8 GW non è sufficiente per rimpiazzare 10 GW o 33 GW di potenza eolica se essa scomparisse improvvisamente. Nemmeno il totale dell'energia immagazzinata (30 GWh) è in qualche modo paragonabile con i 1200 GWh a cui siamo interessati ad immagazzinare per poter passare indenni un periodo di vento calmo.

Gli impianti di pompaggio possono in qualche modo essere drasticamente aumentati? Potremmo immaginare di risolvere l'intero problema dei periodi di pausa utilizzando solamente gli accumuli a pompaggio?

Figura 26.6. Llyn Stwlan, la riserva a monte dell'impianto di stoccaggio di Ffestiniog nel nord del Galles. Energia stoccata: 1.3 GWh. Foto di Adrian Pingstone.

Possiamo accumulare 1200 GWh?

Siamo interessati a costruire sistemi di stoccaggio molto più grandi, in grado di immagazzinare un totale di 1200 GWh (circa 130 volte quello che può accumulare Dinorwig). E ci piacerebbe una capacità di circa 20 GW – circa dieci volte maggiore di quella di Dinorwig. Quindi ecco qui la soluzione: dobbiamo immaginare di creare grosso modo 12 nuovi siti, ognuno capace di stoccare 100 GWh – a grandi linee dieci volte l'energia immagazzinata a Dinorwig. Gli impianti e le macchine per il pompaggio e la generazione di potenza di ogni sito dovrebbero essere gli stessi che a Dinorwig.

Ipotizzando di avere delle turbine idroelettriche con un rendimento del 90%, la tabella 26.7 mostra qualche via per stoccare 100 GWh, per differenti valori di dislivello tra i bacini. (Per la fisica che sottende questa tabella, si vedano le note di fine capitolo).

Modi per immagazzinare 100 GWh		
dislivello tra i due laghi	volume di lavoro richiesto (milioni di m^3)	esempio della dimensione del lago superficie profondità
500 m	40	$2\,km^2 \times 20\,m$
500 m	40	$4\,km^2 \times 10\,m$
200 m	100	$5\,km^2 \times 20\,m$
200 m	100	$10\,km^2 \times 10\,m$
100 m	200	$10\,km^2 \times 20\,m$
100 m	200	$20\,km^2 \times 10\,m$

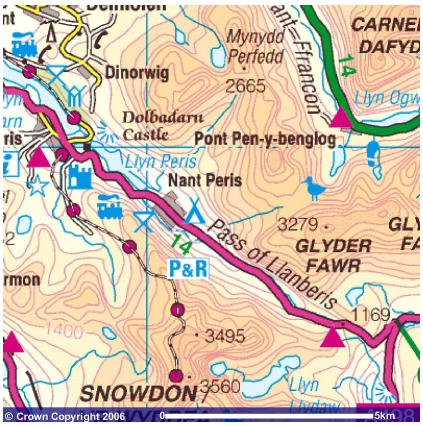
Tabella 26.7. Accumulo mediante pompaggio. Modi per immagazzinare 100 GWh. A titolo comparativo (colonna 2), il volume di acqua utile di Dinorwig è 7 milioni di m^3, e il volume del lago Windermere è 300 milioni di m^3. Un'altro confronto (colonna 3): il lago artificiale di Rutland Waters ha un'area di $12.6\,km^2$; Grafham Waters una superficie di $7.4\,km^2$. La riserva della valle di Carron occupa una superficie di $3.9\,km^2$. Il lago più grande in Gran Bretagna è Loch Lomond, con una superficie di $71\,km^2$.

È possibile trovare dodici siti con queste caratteristiche? Certo, potremmo costruire molti più impianti come Dinorwig nella sola regione di Snowdonia. La Tabella 26.8 mostra due siti alternativi vicino a Ffestiniog dove due impianti uguali a Dinorwig potrebbero essere costruiti. Questi siti furono considerati insieme a Dinorwig negli anni '70, ma alla fine fu scelto Dinorwig.

sito proposto	potenza (GW)	dislivello (m)	volume (milioni di m^3)	energia stoccata (GWh)
Bowydd	2.40	250	17.7	12.0
Croesor	1.35	310	8.0	6.7

Tabella 26.8. Siti alternativi per l'installazione di impianti di pompaggio a Snowdonia. Per entrambi i siti, il lago a valle sarebbe una nuova riserva artificiale.

In Scozia potrebbero essere costruiti impianti di stoccaggio mediante pompaggio in grado di immagazzinare molta più energia di Dinorwig, riqualificando gli impianti idroelettrici esistenti. Analizzando una carta della Scozia, un sito candidato potrebbbe essere Loch Sloy come suo lago a monte e Lomond come suo lago a valle. C'è già una piccola centrale idroelettrica che collega questi due laghi. La Figura 26.9 mostra questi



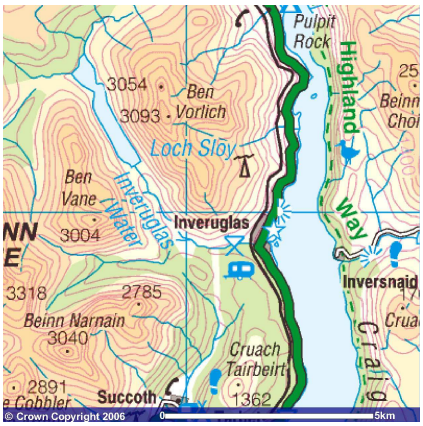
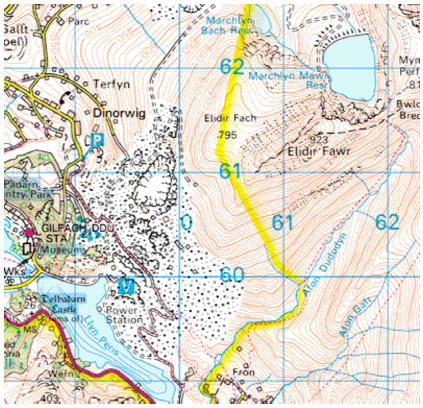
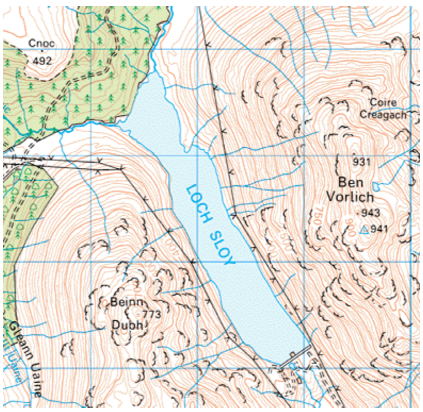


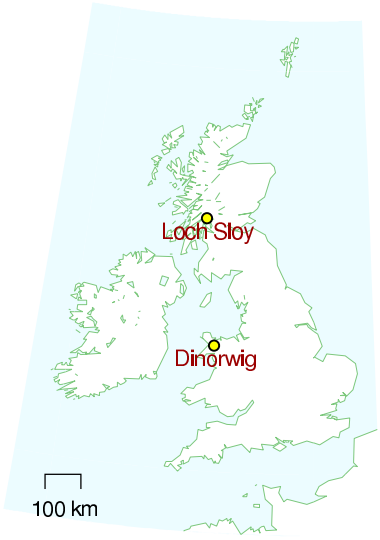
Figura 26.9. Dinorwig, nel Parco Nazionale di Snowdonia, messo a confronto con i laghi di Loch Sloy e Loch Lomond. Le mappe sopra mostrano superfici di di 10 km per 10 km. La griglia blu in quelle sottostanti denota un quadrato di 1 km di lato. Immagini prodotte usando il servizio Get-a-map `www.ordnancesurvey.co.uk/getamap`. e usate con il permesso di Ordnance Survey. © Crown Copyright 2006.



A **Dinorwig** si trova un impianto da 9 GWh che sfrutta Marchlyn Mawr (615E, 620N) e Llyn Peris (590E, 598N) come bacini a monte e a valle.



Loch Sloy illustra il tipo di paesaggio dove un impianto di stoccaggio da 40 GWh potrebbe essere costruito.



laghi e i laghi di Dinorwig sulla stessa scala. Il dislivello tra Loch Sloy e Loch Lomond è di circa 270 m. La superficie di Loch Sloy è di circa 1.5 km^2, e potrebbe già immagazzinare un'energia di 20 GWh. Se la diga di Loch Sloy venisse alzata di ulteriori 40 m allora l'energia extra che potrebbe essere immagazzinata sarebbe di circa 40 GWh. Il livello dell'acqua a Loch Lomond cambierebbe al massimo di 0.8 m durante un ciclo. Questa variazione è inferiore a quella media annuale del livello dell'acqua del lago (2 m).

Figura 26.10 mostra tredici luoghi in Scozia potenzialmente adatti al sistema di accumulo per pompaggio. (In molti di questi è già presente un'impianto idroelettrico). Se dieci di questi avessero lo stesso potenziale che io ho stimato per Loch Sloy, allora potremmo immagazzinare 400 GWh – un terzo dei 1200 GWh che stavamo cercando.

Potremmo perlustrare la carta della Gran Bretagna per trovare altri luoghi. I posti migliori sarebbero vicino a grandi parchi eolici. Un'idea sa-

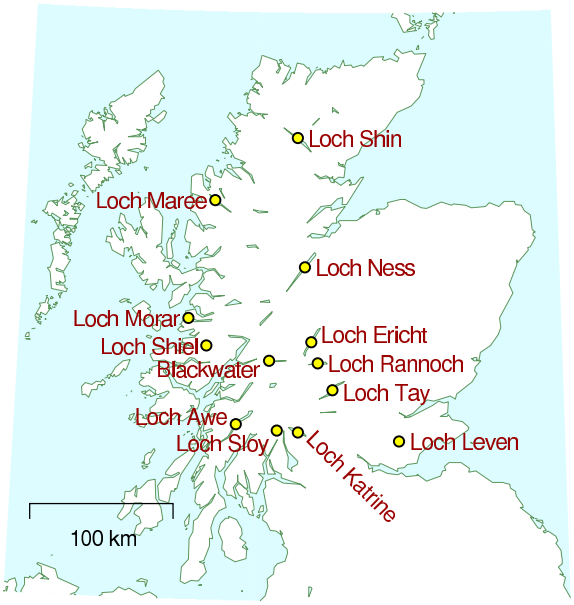


Figura 26.10. Laghi in Scozia con un potenziale per impianti di pompaggio.

rebbe di costruire nuovi laghi artificiali in valli (con una diga costruita all'entrata) sospese a strapiombo sul mare, utilizzando il mare stesso come bacino inferiore.

Pensandoci meglio, potremmo immaginare di lasciare da parte laghi e riserve, posizionando la metà dell'impianto in una cavità sotterranea. Alcuni hanno già presentato l'idea di una cavità per il pompaggio ad un chilometro sotto Londra.

Costruendo più sistemi di immagazzinamento a pompaggio, potremmo incrementare al massimo l'energia immagazzinabile da 30 GWh a 100 GWh e forse 400 GWh. Il raggiungimento del valore di 1200 GWh sembra davvero difficile. Fortunatamente esiste un'altra soluzione.

Figura 26.11. La centrale di pompaggio di Okinawa che utilizza come riserva inferiore l'oceano. Energia immagazzinata: 0.2 GWh. Per gentile concessione di J-Power. `www.ieahydro.org`.

Gestione della domanda utilizzando veicoli elettrici

Ricapitoliamo: vorremmo essere capaci di immagazzinare o di sopravvivere senza 1200 GWh, che equivalgono a 20 kWh a persona; inoltre vorremo far fronte a oscillazioni nella produzione fino a 33 GW – che equivalgono a 0.5 kW a persona. Questi numeri sono deliziosamente simili (come ordine di grandezza) alle richieste energetiche e di potenza delle auto elettriche. Le auto elettriche che abbiamo visto nel Capitolo 20 avevano capacità di immagazzinamento tra 9 kWh e 53 kWh. Una flotta nazionale di 30 milioni di auto elettriche immagazzinerebbe una quantità di energia simile a 20 kWh a persona! I caricatori di batterie consumano in media una potenza di 2 o 3 kW. Accendere simultaneamente 30 milioni di caricatori di batterie, quindi, provocherebbe un aumento della domanda di circa 60 GW! La

potenza media richiesta per alimentare l'intero trasporto nazionale, se fosse interamente elettrico, sarebbe a grandi linee 40 o 50 GW. Esiste, quindi, una forte vicinanza tra l'uso delle auto elettriche proposto nel Capitolo 20 e la creazione di 33 GW di capacità eolica, erogante 10 GW di potenza media.

Ecco un modo in cui questo legame potrebbe essere sfruttato: le auto elettriche potrebbero essere collegate a caricatori intelligenti, a casa o al lavoro. Questi caricatori intelligenti sarebbero consapevoli sia del costo dell'elettricità, sia delle esigenze dell'utilizzatore dell'auto (per esempio, "la mia auto deve essere completamente carica per le sette di lunedì mattina"). Il caricatore soddisferebbe saggiamente le richieste dell'utilizzatore trangugiando elettricità ogni volta che il vento soffia, e spegnendosi quando il vento cala, o quando altre forme di richiesta aumentano. Questi caricatori intelligenti fornirebbero un utile servizio nel bilanciare la rete, un servizio che potrebbe essere premiato anche economicamante.

Potremmo avere una soluzione particolarmente robusta se le batterie delle auto fossero intercambiabili. Immaginate di fare un salto in una stazione di servizio e montare un set di batterie cariche in cambio delle proprie batterie esauste. La stazione di rifornimento sarebbe responsabile della ricarica delle batterie; potrebbero farlo nei momenti più adatti, accendendo o spegnendo i loro caricatori in modo che la domanda e la produzione totali siano sempre mantenute bilanciate. L'utilizzo di batterie intercambiabili è una soluzione oltretutto a prova di sbaglio perché potrebbero esserci milioni di batterie di ricambio nei magazzini delle stazioni di rifornimento. Queste batterie di scorta costituirebbero un aiuto extra nell'aiutarci a passare indenni periodi prolungati di pausa del vento più lunghi del previsto. Alcune persone direbbero: "Ma che orrore! Come potrei fidarmi della stazione di rifornimento che cura le mie batterie? E se me ne dessero una scarica?". Bè, potreste ugualmente chiedervi in questo momento "e se il benzinaio mi avesse fornito della benzina allungata con l'acqua?". Personalmente, userei molto più volentieri un veicolo manutenuto da un professionista, piuttosto che da un Muppet come me!

Ricapitoliamo, allora, le nostre opzioni. Possiamo bilanciare domande e forniture fluttuanti accendendo e spegnendo *generatori* di potenza (inceneritori di rifiuti e centrali idroelettriche, per esempio); *stoccando* energia da qualche parte e generandola quando ce n'è bisogno; o accendendo o spegnendo l'*utenza*.

La più promettente di queste opzioni, in termini di scala, è l'accensione e lo spegnimento della domanda energetica della ricarica dei veicoli elettrici. 30 milioni di automobili, con 40 kWh di batterie ciascuna (alcune delle quali potrebbero essere batterie intercambiabili depositate in stazioni di servizio) ammontano a 1200 GWh. Se le spedizioni delle merci fossero anch'esse elettrificate, allora la capacità totale di stoccaggio sarebbe ancora più grande.

C'è quindi un'elegante corrispondenza tra la potenza eolica e i veicoli

elettrici. Se aumentassimo i veicoli elettrici parallelamente all'aumento della potenza eolica, grosso modo 3000 nuovi veicoli ogni 3 MW di turbine eoliche, e se facessimo in modo che i sistemi di ricarica per veicoli siano intelligenti, questa sinergia potrebbe risolvere buona parte del problema delle fluttuazioni del vento. Se la mia previsione sui veicoli ad idrogeno fosse sbagliata, e i veicoli ad idrogeno diventassero i veicoli a basso consumo di energia del futuro, allora la corrispondenza di vento e veicoli elettrici che ho appena descritto potrebbe certamente essere rimpiazzata con una corrispondenza vento-idrogeno. Le turbine eoliche produrrebbero elettricità; e in caso di eccesso di elettricità verrebbe prodotto e stoccato in serbatoi l'idrogeno, per utilizzarlo in un secondo momento in veicoli o in altre applicazioni, come la produzione del vetro.

Altre idee di gestione della domanda e stoccaggio

Ci sono alcune altre opzioni di gestione della domanda e stoccaggio dell'energia che esamineremo ora.

L'idea di modificare il ritmo della produzione degli oggetti per incontrare la potenza di una fonte rinnovabile non è un'idea nuova. Molte industrie per la produzione dell'alluminio sono localizzate vicino a centrali idroelettriche; più piove, più alluminio viene prodotto. Ogni volta che la potenza viene utilizzata per produrre oggetti che sono immagazzinabili, esiste un potenziale per spegnere e accendere questa richiesta di potenza in modo intelligente. Per esempio, i sistemi ad osmosi inversa (che producono acqua pura da acqua di mare – si veda p.15) sono grandi consumatori di potenza in molti stati (ma non in Gran Bretagna). Un'altro prodotto immagazzinabile è il calore. Se, come consigliato nel Capitolo 21, elettrificassimo gli impianti di riscaldamento e raffreddamento degli edifici, in particolare per il riscaldamento dell'acqua e dell'aria, allora ci sarebbe un potenziale per attaccare alla rete molte utenze facilmente accendibili e spegnibili. Edifici ben isolati mantengono il loro calore per molte ore, quindi c'è flessibilità nella programmazione del loro riscaldamento. Inoltre, potremmo annettere agli edifici grandi riserve termiche e utilizzare pompe di calore per pompare calore all'interno o all'esterno di queste riserve nei momenti di abbondanza di elettricità; in seguito si potrebbe usare un secondo gruppo di pompe di calore per erogare caldo o freddo dalle riserve verso i posti dove sono richiesti riscaldamento e raffrescamento.

Il controllo automatico della domanda di elettricità sarebbe facile. Il modo più semplice di farlo è di avere dispositivi come frigoriferi e freezer che "ascoltano" la frequenza della rete elettrica. Quando c'è un calo della potenza sulla rete, la frequenza scende sotto il suo valore standard di 50 Hz; quando c'è un eccesso di potenza, questa sale oltre i 50 Hz. (É come la dinamo di una bicicletta: quando accendi le luci, devi pedalare più forte per fornire la potenza extra richiesta; se non lo si fa, la bicicletta andrà un po' più piano). I frigoriferi possono essere modificati per girare i

loro termostati un po' in alto o in basso come risposta alle frequenze della rete, in modo tale che, senza mai compromettere la temperatura del vostro burro, essi tendano ad assorbire potenza nei momenti in cui ciò aiuti la rete.

La gestione della domanda può fornire una parte significativa di immagazzinamento virtuale? Quanto sono grandi i frigoriferi della nazione, visti come vasche contenitrici di potenza? In media, un tipico frigorifero-freezer combinato consuma circa 18 W; supponiamo che il numero di frigoriferi sia di circa 30 milioni. Quindi la possibilità di spegnere tutti i frigoriferi della nazione per qualche minuto sarebbe equivalente a 0.54 GW di potenza regolabile automaticamente. É un bel po' di potenza elettrica – più dell'1% del totale nazionale – e come dimensione è simile agli incrementi improvvisi nella domanda prodotti quando le persone, unite in un atto di osservanza religiosa (come quello di guardare la serie televisiva EastEnders [soap opera molto seguita nel Regno Unito. (N.d.T.)]), simultaneamente accendono il loro bollitore elettrico. Questo genere di "riunioni televisive" producono tipicamente incrementi nella domanda di 0.6–0.8 GW. Spegnere ogni frigorifero automaticamente coprirebbe *quasi* completamente queste bizzarrie quotidiane, quali l'accensione dei bollitori. Questi frigoriferi intelligenti potrebbero anche aiutare a far fronte alle fluttuazioni di breve termine della potenza del vento. Le riunioni televisive associate con atti di osservanza ancora più sacri (per esempio, come guardare l'Inghilterra giocare a calcio contro la Svezia) possono produrre improvvisi aumenti della domanda di più di 2 GW. In queste occasioni, la domanda e la produzione elettrica sono mantenute bilanciate scatenando Dinorwig a piena potenza.

Per fornire flessibilità ai gestori della rete elettrica, i quali regolano continuamente le centrali per far corrispondere la domanda e la produzione, molti utenti industriali hanno contratti speciali che permettono ai gestori di spegnere la richiesta di potenza legata a queste utenze con un preavviso molto corto. In Sud Africa (dove ci sono frequenti interruzioni di elettricità), stanno per essere installati sistemi di gestione della domanda radio controllati in centinaia di migliaia di case, per controllare sistemi di condizionamento dell'aria e bollitori d'acqua elettrici.

La soluzione danese

Ecco come la Danimarca affronta l'intermittenza della sua potenza eolica. La Danimarca paga per usare gli impianti idroelettrici degli altri stati come impianti di stoccaggio. Quasi tutta la potenza eolica danese è esportata verso i suoi vicini europei, alcuni dei quali possiedono potenza idroelettrica, che possono ridurre per bilanciare il tutto. La potenza idroelettrica risparmiata è poi rivenduta ai danesi (ad un prezzo maggiore) durante il successivo periodo di bassa potenza eolica e alta domanda. Tutto sommato

il vento danese fornisce energia utilizzabile e il sistema, nel suo complesso, è molto sicuro grazie alla capacità del sistema idroelettrico.

La soluzione danese potrebbe essere adottata anche dalla Gran Bretagna? Avremmo bisogno di connessioni dirette ad alta capacità verso stati con molta potenza idroelettrica accendibile e spegnibile; o una grande connessione a una rete elettrica di scala europea.

La Norvegia ha 27.5 GW di capacità idroelettrica. La Svezia ne ha grosso modo 16 GW. E l'Islanda ne possiede 1.8 GW. Nel 2003 si discusse di un'interconnessione ad alta tensione in corrente continua da 1.2 GW verso la Norvegia, ma non fu costruita. Una connessione con l'Olanda sarà costruita nel 2010 – si tratta del progetto BritNed, con una capacità di 1 GW. La capacità eolica della Danimarca è di 3.1 GW, ed ha una connessione da 1 GW con la Norvegia, una da 0.6 GW con la Svezia, e una da 1.2 GW con la Germania, ovvero una capacità di esportazione totale di 2.8 GW, davvero molto vicina alla sua capacità eolica. Per poter esportare tutto l'eccesso di potenza elettrica allo stesso modo della Danimarca, la Gran Bretagna (ipotizzando 33 GW di capacità eolica) avrebbe bisogno di qualcosa come una connessione da 10 GW verso la Norvegia, una da 8 GW verso la Svezia, e una da 1 GW verso l'Islanda.

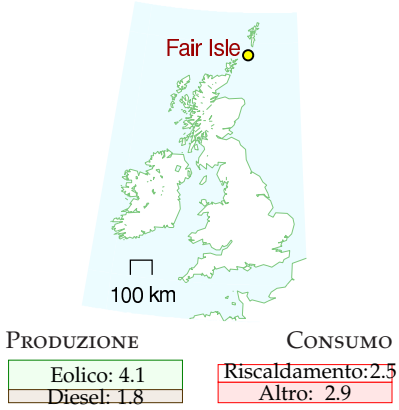


Figura 26.12. Produzione e consumo elettrico sull'isola Fair Isle, 1995–96. Tutti i numeri sono in kWh/giorno per persona. La produzione supera il consumo, perché 0.6 kWh/giorno per persona sono state gettate via.

Una soluzione con due reti

Un approccio radicale è quello di collegare la potenza eolica e delle altre fonti intermittenti ad una *seconda* rete elettrica distinta da quella esistente e collegata a sistemi che non richiedono di essere alimentati nel tempo in maniera precisa, come il riscaldamento e la ricarica delle batterie dei veicoli elettrici. Da più di 25 anni (precisamante dal 1982), l'isola scozzese di Fair Isle (popolazione: 70 abitanti, superficie: 5.6 km^2) ha *due* reti elettriche che distribuiscono la potenza di due turbine eoliche e, se necessario, di un generatore elettrico alimentato a gasolio. Il servizio elettrico standard è fornito da una rete, mentre il riscaldamento elettrico è alimentato da un secondo set di cavi. Questo si serve principalmente dell'elettricità prodotta in eccesso dalle turbine eoliche e che altrimenti avrebbe dovuto essere gettata via. Dei relè programmabili a distanza sensibili alla frequenza della rete controllano i boiler dell'acqua calda e i radiatori elettrici ad accumulo presenti in ogni edificio della comunità. La frequenza della rete elettrica è utilizzata per informare i boiler e i radiatori quando si possono accendere. In realtà ci sono fino a sei canali di frequenza per casa, così il sistema simula sette reti. Fair Isle ha anche testato con successo un sistema di immagazzinamento dell'energia cinetica (un volano) per stoccare l'energia durante le fluttuazioni della forza del vento su una scala temporale di 20 secondi.

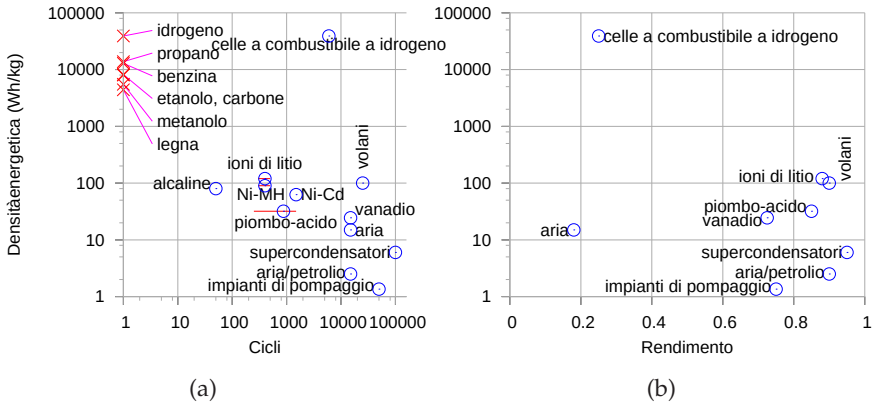


Figura 26.13. Alcune proprietà dei sistemi di stoccaggio e dei carburanti. (a) Densità di energia (in scala logaritmica) in funzione della durata di vita (numero di cicli). (b) Densità di energia in funzione del rendimento. I valori della densità di energia non includono le masse dei contenitori dei sistemi energetici, fatta eccezione per il caso dell'"aria" (stoccaggio di aria compressa). Tenendo conto del peso di un serbatoio per contenere idrogeno, la densità di energia dell'idrogeno si ridurrebbe da 39 000 Wh/kg a circa 2400 Wh/kg.

Veicoli elettrici come generatori

Se 30 milioni di veicoli elettrici fossero disposti ad far funzionare i loro caricatori al contrario reimmettendo potenza in rete nei periodi di bassa produzione nazionale di elettricità, allora, con 2 kW per veicolo, avremmo una potenziale sorgente di potenza di 60 GW – comparabile con la capacità di tutte le centrali della nazione. Anche se solo un terzo dei veicoli fossero connessi e disponibili allo stesso tempo, essi ammonterebbero comunque a una fonte potenziale di 20 GW. Se ognuno di questi veicoli donasse in caso di emergenza 2 kWh di energia – corrispondente forse al 20% della loro capacità massima di accumulo di energia – allora l'energia totale fornita dall'intero parco veicoli sarebbe di 20 GWh – il doppio dell'energia dell'impianto di pompaggio di Dinorwig.

Altre tecnologie di stoccaggio

Esistono molti modi per immagazzinare l'energia e molti criteri in base ai quali le diverse soluzioni sono giudicate. La Figura 26.13 mostra tre dei criteri più importanti: densità di energia (quanta energia può essere immagazzinata per chilogrammo di sistema di accumulo); efficienza (quanta energia ottieni indietro per unità di energia immessa); e durata di vita (quanti cicli di stoccaggio di energia possono essere forniti prima che il sistema abbia bisogno di essere rinnovato). Altri criteri importanti sono: la velocità massima con cui l'energia può essere pompata dentro e fuori, molte volte espresso come una potenza per kg; il tempo lungo il quale l'energia rimane immagazzinata; e, ovviamente, il costo e il grado di sicurezza del sistema.

Volani

La Figura 26.15 mostra un volano mostruoso utilizzato per fornire brevi slanci di potenza del massimo valore di 0.4 GW per alimentare un'im-

combustibile	potere calorifico	
	(kWh/kg)	(MJ/l)
propano	13.8	25.4
benzina	13.0	34.7
gasolio	12.7	37.9
cherosene	12.8	37
olio combustibile	12.8	37.3
etanolo	8.2	23.4
metanolo	5.5	18.0
bioetanolo		21.6
carbone	8.0	
legna da ardere	4.4	
idrogeno	39.0	
gas naturale	14.85	0.04

(a)

tipo di batteria	densità di energia (Wh/kg)	durata della vita (cicli)
nickel-cadmio	45–80	1500
NiMH	60–120	300–500
piombo-acido	30–50	200–300
ioni di litio	110–160	300–500
polimero ioni di litio-	100–130	300–500
ricaricabili alcaline	80	50

(b)

Tabella 26.14. (a) poteri calorifici (densità di energia, per kg e per litro) di alcuni combustibili (in kWh per kg e MJ per litro).
(b) Densità di energia di alcune batterie (in Wh per kg). 1 kWh = 1000 Wh.

pianto sperimentale. Pesa 800 t. Ruotando a 225 giri al minuto, può immagazzinare 1000 kWh, e la sua densità di energia è di circa 1 Wh per kg.

Un sistema a volano progettato per stoccare energia in un'auto da corsa può immagazzinare 400 kJ (0.1 kWh) di energia e pesa 24 kg (p. 138). Si tratta di una densità di energia di 4.6 Wh per kg.

Volani ad alta velocità costruiti con materiali compositi hanno densità di energia fino ad un massimo di 100 Wh/kg.

Figura 26.15. Uno dei due volani in costruzione al centro di ricerca sulla fusione di Culham. Foto: EFDA-JET. `www.jet.efda.org`.

Supercondensatori

I supercondensatori sono utilizzati per immagazzinare piccole quantità di energia (al massimo 1 kWh) quando sono richiesti molti cicli operativi, e la ricarica deve essere completata velocemente. Per esempio, i supercondensatori sono preferiti rispetto alle batterie per sistemi di frenata rigenerativi sui veicoli che fanno molte fermate lungo il loro percorso. Potreste trovare in commercio supercondensatori con una densità di energia di 6 Wh/kg.

La compagnia statunitense EEStor afferma di essere capace di costruire condensatori di qualità superiore utilizzando titanato di bario, arrivando ad una densità di energia di 280 Wh/kg.

Batterie redox al vanadio

I sistemi di potenza a VRB hanno fornito 12 MWh di capacità di immagazzinamento di energia per il parco eolico di Sorne Hill in Irlanda, la cui capacità attuale è di "32 MW" in via di aumento a "39 MW". (VRB sta per vanadium redox battery). Questo sistema di immagazzinamento è una grande "batteria di flusso" ovvero una cella a combustibile redox rige-

nerativa, con un paio di cisterne piene di vanadio in diversi stati chimici. Questo sistema di stoccaggio può livellare la produzione in uscita dal parco eolico su una scala temporale di minuti, ma il tempo più lungo per cui può erogare un terzo della sua capacità (durante un periodo di calma del vento) è un'ora.

Un sistema al vanadio da 1.5 MWh che costa $480 000, occupa 70 m^2 ed ha una massa di 107 tonnellate. La batteria redox al vanadio ha una durata di vita di più di 10 000 cicli. Può essere ricaricata alla stessa velocità alla quale viene scaricata (al contrario delle batterie piombo-acido che devono essere caricate cinque volte più lentamente). La sua efficienza è compresa tra il 70% e il 75%, nel ciclo completo di carica e scarica. Il volume richiesto per immagazzinare 20 kWh, è di circa 1 m^3 di vanadio 2-molare in un bagno d'acido solforico. (ovvero 20 Wh/kg).

Quindi, per immagazzinare 10 GWh sarebbero necessari 500 000 m^3 (170 vasche di piscina) – per esempio, cisterne alte 2 m occupanti una superficie di 500 m $\times$ 500 m.

Sviluppare la tecnologia al vanadio per soddisfare le grandezze in gioco di un grande impianto di stoccaggio – 10 GWh – potrebbe avere un effetto degno di nota sul mercato mondiale del vanadio, anche se, a lungo termine, non ci sono previsioni di carenze dell'elemento. L'attuale produzione mondiale di vanadio è di 40 000 tonnellate all'anno. Un sistema da 10 GWh ne richiederebbe 36 000 tonnellate – circa il valore della produzione attuale di un anno. Attualmente viene estratto come sottoprodotto di altri processi, e le riserve mondiali sono stimate essere di 63 milioni di tonnellate.

Soluzioni "economiche"

Nel mondo del giorno d'oggi in cui non vi è nessun costo associato all'inquinamento del carbonio, l'altra soluzione che un impianto di stoccaggio deve battere finanziariamente è una brutta alternativa: l'immagazzinamento può essere emulato semplicemente aggiungendo una centrale a gas per soddisfare la domanda improvvisa, mentre l'energia elettrica in eccesso viene dissipata in calore.

Fluttuazioni stagionali

Le fluttuazioni nella produzione e nella domanda che hanno la scala temporale più lunga sono quelle stagionali. La fluttuazione più importante è quella del riscaldamento degli edifici, che sale ogni inverno. L'attuale richiesta di gas naturale della Gran Bretagna varia durante l'anno, da un valore tipico medio di 36 kWh/gg per persona in luglio e agosto a uno di 72 kWh/gg per persona da dicembre a febbraio, fino a valori massimi di 30–80 kWh/gg/p (figura 26.16).

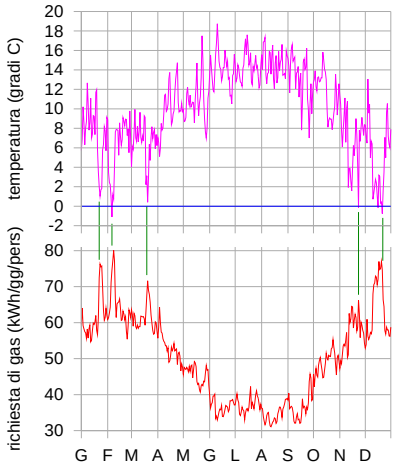


Figura 26.16. Richiesta di gas (grafico inferiore) e temperatura esterna (grafico superiore) in Gran Bretagna nel 2007.

Anche alcune rinnovabili hanno fluttuazioni annuali – la potenza solare è più grande in estate mentre quella eolica è più piccola.

Come attraversare queste fluttuazioni di lunghissimo termine? I veicoli elettrici e lo stoccaggio mediante pompaggio non saranno sufficienti a mettere via le quantità richieste. Una tecnologia utile sarà sicuramente lo stoccaggio termico a lungo termine. Una roccia grande o un grande quantità d'acqua possono immagazzinare il calore richiesto in inverno da un edificio – il Capitolo E presenta questa idea in dettaglio. In Olanda, il calore estivo delle strade viene immagazzinato in pozze d'acqua fino all'inverno e fornito agli edifici mediante pompe di calore [2wmuw7].

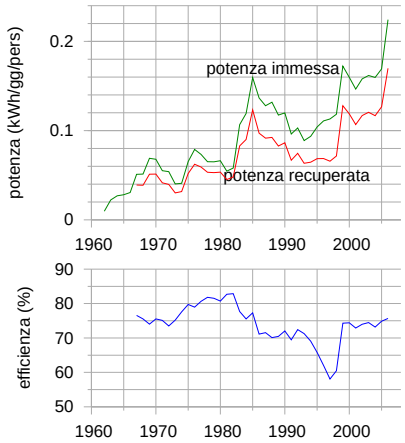


Figura 26.17. Efficienza di quattro sistemi britannici di stoccaggio mediante pompaggio .

Note e approfondimenti

p.

208 *La produzione totale del parco di tutte le turbine eoliche della Repubblica d'Irlanda.* Dati provenienti da `eirgrid.com` [2hxf6c].

207 *"La scomparsa del vento causa lo stato di emergenza nella rete elettrica in Texas".* [2l99ht] In realtà, la mia lettura di questo articolo d'attualità è che questo evento, seppur insolito, era un esempio di funzionamento *normale* della rete. La rete possiede clienti industriali la cui produzione può essere interrotta, in caso di uno sbilanciamento tra domanda e produzione. L'erogazione della potenza del vento è calata di 1.4 GW nello stesso momento in cui la domanda texana saliva di 4.4 GW, causando esattamente questo fatto. Le forniture di energia interrompibili furono interrotte. Tutto andò come previsto.
Ecco un altro esempio, dove una migliore pianificazione del sistema di potenza avrebbe aiutato: "La produzione eolica in Spagna stabilisce un nuovo record, sono state ordinate delle interruzioni nella produzione". [3x2kvv] Il consumo medio di elettricità in Spagna è 31 GW. Martedì 4 marzo 2008, i suoi generatori eolici stavano erogando 10 GW. "Il mercato energetico spagnolo è diventato particolarmente sensibile alle fluttuazioni del vento".

208 *I sostenitori dell'energia eolica minimizzano questo problema: "Non preoccupatevi – i singoli parchi eolici possono essere intermittenti, ma presi nell'insieme, la somma di tutti i parchi eolici è molto meno intermittente"* Per esempio, si veda il sito `yes2wind.com`, che, sulla sua pagina "debunking the myth that wind power isn't reliable" afferma che "la variazione della potenza erogata dai parchi eolici distribuiti nella nazione è scarsamente degna di nota". `www.yes2wind.com/intermittency_debunk.html`

– *...il vento* **è** *intermittente, anche se sommiamo molte turbine sparse per tutta la nazione. La Gran Bretagna è un po' più grande dell'Irlanda, ma il problema rimane lo stesso anche qui.* Fonte: Oswald et al. (2008).

212 *L'efficienza dell'impianto di pompaggio di Dinorwig è del 75%.* La Figura 26.17 mostra i dati. Ulteriori informazioni a proposito di Dinorwig e i siti alternativi per lo stoccaggio mediante pompaggio: Baines et al. (1983, 1986).

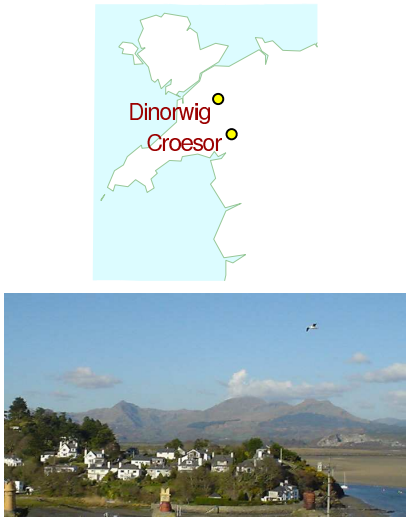


Figura 26.18. Un possibile sito per un'altro impianto da 7 GWh. Croesor valley è nella parte centrale a sinistra, tra i picchi affilati (Cnicht) sulla sinistra e le montagne più larghe (the Moelwyns) sulla destra.

213 *Tabella 26.7.* Il volume di acqua utile richiesto, V, è calcolato a partire dal valore del dislivello h come segue. Se ϵ è l'efficienza della conversione dell'energia potenziale in elettricità,

$$V = 100\,\mathrm{GWh}/(\rho g h \epsilon),$$

dove ρ è la densità dell'acqua e g è l'accelerazione di gravità. Ho ipotizzato che i generatori avessero un rendimento $\epsilon = 0.9$.

213 *Tabella 26.8*, *Siti alternativi per impianti di pompaggio*. Il bacino a monte proposto per Bowydd, era Llyn Newydd, riferimenti nella griglia SH 722 470; per Croesor: Llyn Cwm-y-Foel, SH 653 466.

214 *Se esistessero dieci impianti di pompaggio con lo stesso potenziale di Loch Sloy, allora potremmo stoccare 400 GWh.* Questa stima grossolana è confermata da uno studio della Strathclyde University [5o2xgu] che ha fatto una lista di quattordici siti che possiedono una capacità stimata di immagazzinamento di 514 GWh.

218 *I frigoriferi potrebbero essere modificati per girare i loro termostati un po' in alto o in basso ... in risposta alla frequenza della rete principale*. [2n3pmb] Ulteriori link: Dynamic Demand `www.dynamicdemand.co.uk`; `www.rltec.com`; `www.responsiveload.com`.

– *In Sud Africa ... sistemi di gestione della domanda sono in corso d'installazione*.
Fonte: [2k8h4o]

219 *Quasi tutta la potenza eolica danese viene esportata verso i suoi vicini europei.* Fonte: Sharman (2005).

– *Da più di 25 anni (precisamante dal 1982), Fair Isle ha* due *reti elettriche.*
`www.fairisle.org.uk/FIECo/`
Per la maggior parte del tempo le velocità del vento sono tra 3 m/s e 16 m/s; 7 m/s è la velocità più probabile.

220 *Figura 26.13*. *Rendimenti di stoccaggio*. Batterie al litio: 88%.
Fonte: `www.national.com/appinfo/power/files/swcap_eet.pdf`
Batterie piombo-acido: 85–95%.
Fonte: `www.windsun.com/Batteries/Battery_FAQ.htm`
Accumulo ad aria compressa: 18%. Fonte: Lemofouet-Gatsi and Rufer (2005); Lemofouet-Gatsi (2006). Si veda anche Denholm et al. (2005).
Aria/olio: gli accumulatori idraulici, come quelli utilizzati per la frenata rigenerativa sui camion, sono dispositivi di accumulo ad aria compressa che possono essere efficienti al 90% tra carica e scarica e permettono di catturare il 70% dell'energia cinetica. Fonti: Lemofouet-Gatsi (2006), [5cp27j].

221 *Tabella 26.14*. Fonti: Xtronics `xtronics.com/reference/energy_density.htm`; Battery University [2sxlyj]; informazioni sul volano provenienti da Ruddell (2003).
Le ultime batterie con la più alta densità di energia sono le batterie a litio-sulfuro, che hanno una densità energetica di 300 Wh/kg.
Alcuni disillusi entusiasti sostenitori dell'idrogeno, sembrano essersi mossi in alto sulla tavola periodica degli elementi e sono diventati fan del boro. Il boro (assumendo di bruciarlo per ottenere B_2O_3) ha una densità di energia di 15 000 Wh per kg, che non è per niente male. Ma immagino che i miei dubbi più grandi sull'idrogeno si possano applicare anche al boro: la produzione del combustibile (in questo caso il boro dall'ossido di boro) sarà altrettanto inefficiente in termini energetici così come lo sarà il processo di combustione.

– *Batterie redox al vanadio.* Fonti: `www.vrbpower.com`; *parco eolico irlandese* [ktd7a]; *velocità di ricarica* [627ced]; *produzione mondiale* [5fasl7].

223 *... il calore estivo delle strade viene immagazzinato in pozze d'acqua...* [2wmuw7].

27 Cinque piani energetici per la Gran Bretagna

Se vogliamo uscire dalla nostra attuale dipendenza dai combustibili fossili abbiamo bisogno di un piano di azione radicale. E tale piano ha bisogno che i conti tornino. Il piano necessita anche di una tabella di marcia politica e finanziaria. Politica ed economia non fanno parte degli obiettivi di questo libro, pertanto qui mi limiterò a discutere di ciò che potrebbe assomigliare al lato tecnico di un piano dove i conti tornano.

Esistono molti piani con i conti in ordine. In questo capitolo ne descriverò cinque. Vi prego di non prendere uno qualsiasi dei piani che presento come "la soluzione consigliata dall'autore". L'unica mia raccomandazione è questa:

> *Assicuratevi che le vostre politiche comprendano un piano dove i conti tornano!*

Ogni piano ha una componente consumi ed una componente produzione: occorre specificare quanta potenza il nostro Paese consumerà e come tale potenza dovrà essere prodotta. Per evitare che i piani occupino molte pagine, tratterò una versione stilizzata del nostro Paese, in cui consumiamo energia in sole tre forme: trasporti, riscaldamento ed elettricità. Questa è una semplificazione drastica, in cui si omettono industria, agricoltura, cibo, importazioni e così via. Ma spero che sia una semplificazione utile, che ci permetta di confrontare e contrapporre piani alternativi in un minuto. Alla fine occorreranno piani più dettagliati, ma oggi come oggi siamo così lontani dalla nostra meta che ritengo che un semplice modello schematico sia il modo migliore per inquadrare i problemi.

Presenterò qualche piano che ritengo tecnicamente realizzabile per il Regno Unito da qui al 2050. Tutti condivideranno la medesima componente dei consumi. Insisto ancora una volta: questo non significa che ritengo tale comparto consumi quello giusto o l'unico pianificabile. Voglio solo evitare di sovraccaricarvi con una proliferazione di piani. Sul fronte della produzione, mi limiterò a descrivere una serie di piani che utilizzano diversi mix di rinnovabili, "carbone pulito" e nucleare.

La situazione attuale

La situazione attuale nel nostro Paese "in versione fumetto" è la seguente. Il trasporto (sia di esseri umani che di cose) utilizza 40 kWh/gg per persona. La maggior parte di questa energia viene attualmente consumata sotto forma di benzina, gasolio o cherosene. Il riscaldamento di aria ed acqua utilizza 40 kWh/gg per persona. Gran parte di questa energia è attualmente fornita dal gas naturale. L'elettricità erogata ammonta a 18 kWh/gg/p e usa combustibile (principalmente carbone, gas e nucleare) con un contenuto energetico di 45 kWh/gg/p. I restanti 27 kWh/gg/p se ne vanno su per

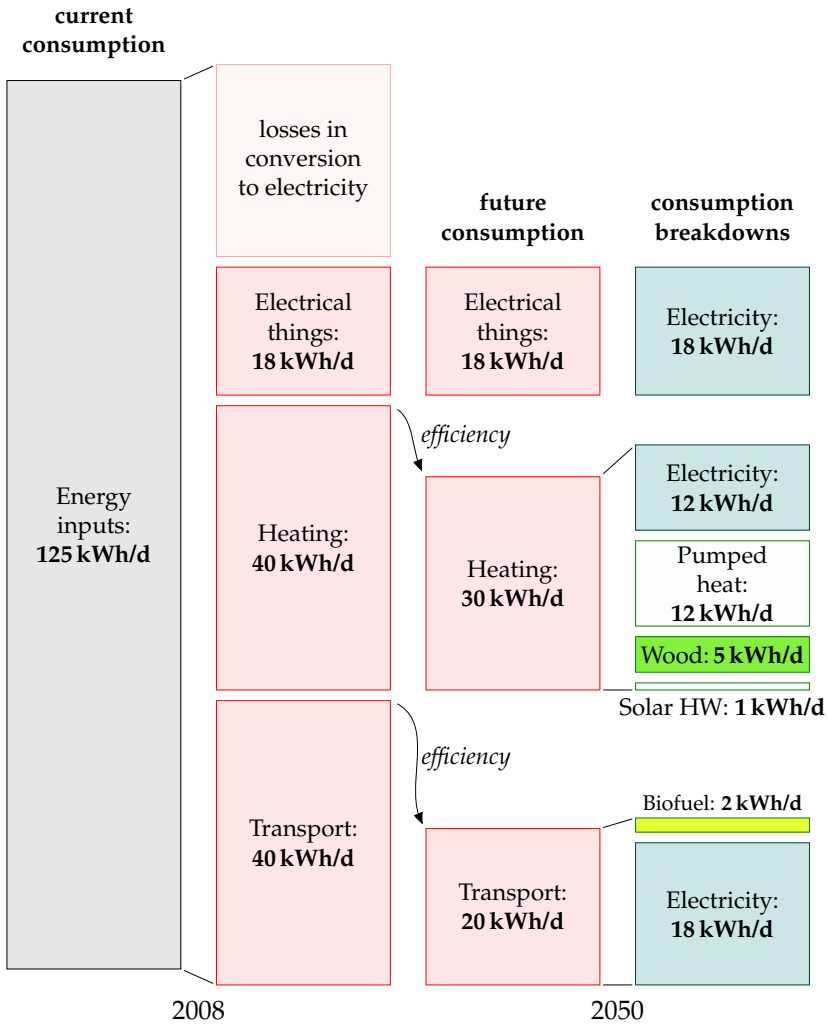


Figura 27.1. Consumi attuali a persona nella "Gran Bretagna versione fumetto del 2008" (prime due colonne a sinistra) ed un piano dei consumi futuri con una possibile ripartizione dei carburanti (ultime due colonne a destra). Tale piano richiede che la fornitura di energia elettrica venga aumentata passando da 18 a 48 kWh/gg a persona.

le torri di raffreddamento (25 kWh/gg/p) e si perdono nei fili della rete di distribuzione (2 kWh/gg/p). L'input energetico totale di questo modello schematico del Paese allo stato attuale è di 125 kWh/gg a persona.

Caratteristiche comuni di tutti e cinque i piani

Nel modello di Paese che mi sono prefigurato per il futuro, i consumi energetici saranno ridotti mediante l'utilizzo di tecnologia più efficiente per i trasporti e il riscaldamento.

Nei cinque piani per il futuro il **trasporto** risulta in gran parte elettrificato. I motori elettrici sono più efficienti rispetto a quelli a benzina, quindi l'energia necessaria per il trasporto è ridotta. Il trasporto pubblico (anch'esso in gran parte elettrificato) è meglio integrato, meglio personaliz-

zato e meglio frequentato. Ho pensato che l'elettrificazione dei trasporti li renda circa quattro volte più efficienti, mentre la crescita economica annulli alcuni di questi risparmi, di modo che l'effetto netto è un dimezzamento del consumo di energia per il trasporto. Ci sono alcuni veicoli essenziali che non possono essere facilmente elettrificati, ma per quelli ci fabbricheremo "in casa" carburanti liquidi (per esempio biodiesel, bio-metanolo o bio-etanolo cellulosico). L'energia per i trasporti è composta da 18 kWh/gg/p di elettricità e 2 kWh/gg/p di combustibili liquidi. Le batterie dei veicoli elettrici fungono da impianti di stoccaggio dell'energia, contribuendo a far fronte alle fluttuazioni della domanda e dell'offerta dell'energia elettrica. L'area necessaria per la produzione di biocarburanti è pari a circa il 12% del Regno Unito (500 m^2 a persona), dato per assunto che la produzione dei biocarburanti provenga da piante 1%-efficienti e che la conversione dalle piante al carburante sia efficiente al 33%. In alternativa, i biocarburanti potrebbero essere importati, se riuscissimo a convincere altri Paesi a dedicare ai biocarburanti per noi una superficie adeguata (avente le dimensioni del Galles) di terreni agricoli.

In tutti e cinque i piani, il consumo di energia per il **riscaldamento** è ridotto, migliorando l'isolamento di tutti gli edifici e migliorando il controllo della temperatura (ossia dei termostati, attraverso l'educazione e la promozione di maglioni resistenti indossati da personalità sexy). I nuovi edifici (tutti quelli costruiti dal 2010 in poi) sono davvero ben isolati e praticamente non richiedono il riscaldamento degli ambienti. I vecchi edifici (che dominano ancora nel 2050) sono principalmente riscaldati mediante pompe di calore aria-aria e geotermiche. Parte del riscaldamento dell'acqua è fornito da pannelli solari (2.5 metri quadrati su ogni casa), parte da pompe di calore ed un po' dall'energia elettrica. Alcuni edifici situati vicino a foreste opportunamente gestite e a piantagioni di colture energetiche sono riscaldati con le biomasse. La potenza necessaria per il riscaldamento viene così ridotta da 40 kWh/gg/p a 12 kWh/gg/p di elettricità, 2 kWh/gg/p di acqua scaldata dal sole e 5 kWh/gg/p di legna.

La legna per la produzione di calore (o, eventualmente destinata alla cogenerazione) proviene da foreste limitrofe e da colture energetiche (probabilmente miscanthus, salici o pioppi) che coprono una superficie di 30 000 km^2, ossia 500 m^2 a persona, corrispondente al 18% dei terreni agricoli del Regno Unito, i quali occupano una superficie di 2800 m^2 a persona. Le colture energetiche sono coltivate principalmente sui terreni di qualità inferiore, lasciando quelli di qualità più elevata all'agroalimentare. Ogni 500 m^2 di colture energetiche si ha un rendimento pari a 0.5 tonnellate all' anno di materiale vegetale secco, con un contenuto energetico di circa 7 kWh/gg; di questa potenza, circa il 30% viene perso nel processo di produzione e distribuzione/consegna del calore. Alla fine il calore fornito è di 5 kWh/gg a persona.

In questi piani, suppongo che sia mantenuta l'attuale domanda di **corrente elettrica** per aggeggi vari, luce e così via. Pertanto, continuano ad

essere necessari 18 kWh(e)/gg/p di energia elettrica. Certo, l'efficienza dell'illuminazione è migliorata passando per la gran parte ai diodi emettitori di luce, e molti altri aggeggi diverranno più efficienti; tuttavia, grazie ai benefici della crescita economica, avremo aumentato il numero degli aggeggi nella vita di tutti i giorni – per esempio i sistemi di videoconferenza, per aiutarci a viaggiare di meno.

Il consumo totale di elettricità in questo piano *sale* (a causa dei 18 kWh/gg/p per il trasporto elettrico e i 12 kWh/gg/p per le pompe di calore) a 48 kWh/gg/p (ossia 120 GW a livello nazionale). Questo è circa il triplo di quanta ne venga realmente consumata oggi nel Regno Unito. Da dove viene questa energia?

Andiamo a descrivere alcune alternative. Non tutte le alternative sono "sostenibili", nel senso definito in questo libro, ma tutti i piani sono a basso tenore di carbonio.

Produrre un sacco di elettricità – i componenti

Per produrre un sacco di energia elettrica, ciascun piano utilizza una certa quantità di vento on-shore ed off-shore; un po' solare fotovoltaico; possibilmente una certa quantità di energia solare acquistata da Paesi con deserti; l'incenerimento dei rifiuti (ivi compreso il pattume e gli scarti agricoli); l'idroelettrico (la stessa quantità che già otteniamo oggi); forse l'energia delle onde; sbarramenti, lagune e flussi di marea; il nucleare, forse, e magari un po' di "combustibile fossile pulito", vale a dire, il carbone bruciato nelle centrali elettriche che fanno la cattura e lo stoccaggio del biossido di carbonio. Ogni piano mira ad una produzione totale di energia elettrica pari a 50 kWh/gg/p in media – ho ottenuto questa cifra arrotondando i 48 kWh/gg/p di domanda media e mettendo in conto una certa perdita nella rete di distribuzione.

Alcuni dei piani che seguono prevedono l'importazione di energia da altri Paesi. Per confronto, può essere utile sapere quanto della nostra potenza viene attualmente importata. La risposta è che, nel 2006, il Regno Unito ha importato 28 kWh/gg/p di combustibile – 23% dei suoi consumi primari. Queste importazioni sono dominate da carbone fossile (18 kWh/gg/p), greggio (5 kWh/gg/p) e gas naturale (6 kWh/gg/p). Il combustibile nucleare (uranio) di norma non è conteggiato tra le importazioni essendo facilmente stoccabile.

In tutti e cinque i piani darò per scontato che l'incenerimento dei rifiuti urbani salirà a tal punto che quasi tutti i rifiuti che non possono essere riciclati in modo utile vengano inceneriti piuttosto che essere smaltiti in discarica. L'incenerimento di 1 kg al giorno per persona di rifiuti rende circa 0.5 kWh/gg di elettricità a persona. Darò anche per scontato che una simile quantità di rifiuti agricoli venga incenerita, producendo 0.6 kWh/gg/p. L'incenerimento di questi rifiuti richiede circa 3 GW di capacità di conversione rifiuto-energia, un aumento di dieci volte rispetto alle centrali di

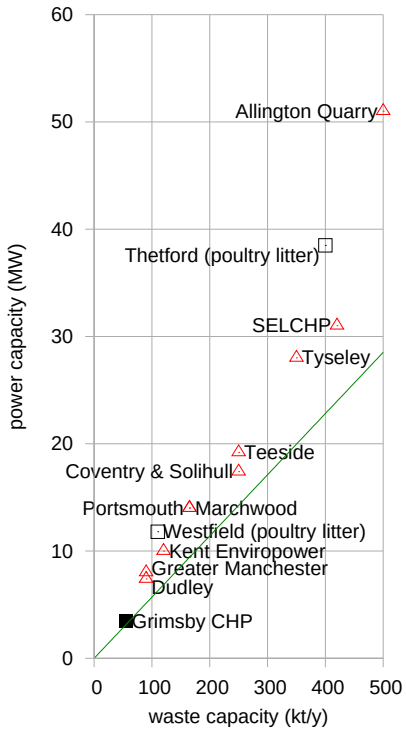


Figura 27.2. Impianti di conversione rifiuto-energia in Gran Bretagna. La linea mostra la produzione media di potenza assumendo la conversione 1 kg di rifiuti → 0.5 kWh energia elettrica.

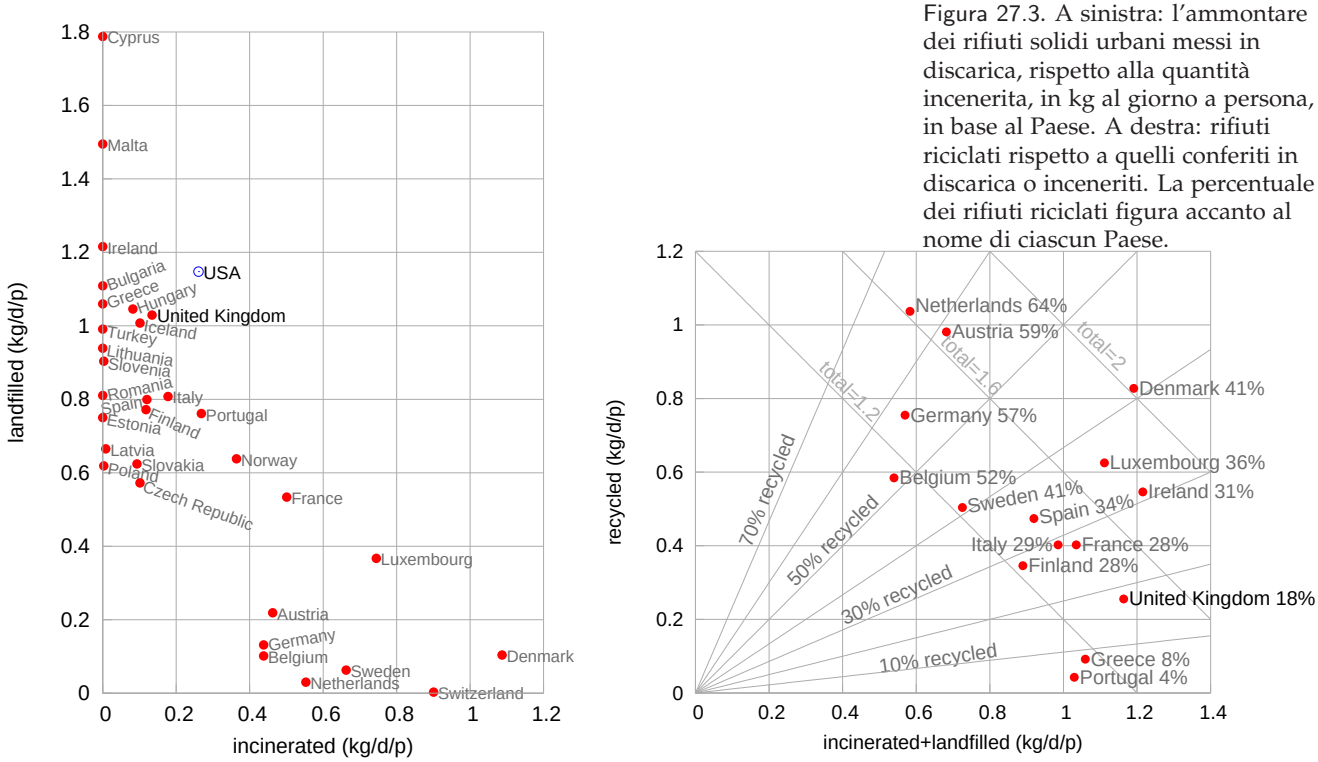


Figura 27.3. A sinistra: l'ammontare dei rifiuti solidi urbani messi in discarica, rispetto alla quantità incenerita, in kg al giorno a persona, in base al Paese. A destra: rifiuti riciclati rispetto a quelli conferiti in discarica o inceneriti. La percentuale dei rifiuti riciclati figura accanto al nome di ciascun Paese.

incenerimento del 2008 (figura 27.2). Londra (7 milioni di persone) avrebbe dodici impianti di conversione rifiuto-energia da 30 MW, come quello di SELCHP a sud della città (si veda p. 321). Birmingham (1 milione di persone) ne avrebbe due. Ogni città da 200 000 abitanti avrebbe un impianto di conversione rifiuto-energia da 10 MW. I timori che l'incenerimento dei rifiuti su questa scala sia difficile, sporco o pericoloso dovrebbero essere fugati dalla figura 27.3, la quale dimostra come svariati Paesi in Europa inceneriscano *molti* più rifiuti per persona rispetto al Regno Unito; questi Paesi amanti dell'incenerimento includono la Germania, la Svezia, la Danimarca, i Paesi Bassi e la Svizzera – nazioni che di solito non vengono associate a problemi di igiene! Un buon effetto collaterale di questo piano di incenerimento dei rifiuti è che elimina emissioni future di metano provenienti dalle discariche.

In tutti e cinque i piani, il contributo dell'idroelettricità è di 0.2 kWh/gg/p, lo stesso di oggi.

I veicoli elettrici vengono impiegati a guisa di carico dinamico regolabile sulla rete elettrica. La potenza media necessaria per ricaricare i veicoli elettrici è di 45 GW (18 kWh/gg/p). Pertanto, le fluttuazioni tipiche delle fonti rinnovabili come il solare e l'eolico possono essere bilanciate aumentando od abbassando il carico, a condizione che tali fluttuazioni non siano

troppo grandi o lunghe. Le oscillazioni giornaliere della domanda di energia elettrica sono destinate a divenire maggiori di quanto non lo siano oggi, dato che il gas utilizzato per cucinare cucinare e riscaldare sarà sostituito dalla corrente elettrica (si veda figura 26.16, p. 222). Per garantire che i picchi di domanda da 10 GW che durano fino a 5 ore possano essere coperti, tutti i piani dovrebbero basarsi sulla costruzione di cinque nuovi impianti di pompaggio, come quello di Dinorwig (o sull'aggiornamento degli impianti idroelettrici, per fornire apporti di pompaggio). 50 GWh di stoccaggio sono pari a cinque Dinorwig, ciascuno con una capacità di 2 GW. Alcuni dei piani che seguono richiederanno pompaggio extra oltre a questo. Per l'assicurazione supplementare, tutti i piani dovrebbero basarsi sulla costruzione di un'infrastruttura di interconnessione con la Norvegia, avente una capacità pari a 2 GW.

Figura 27.4. Piano D

Produrre un sacco di elettricità – Piano D

Il Piano D (la "D" sta per "diversità domestica") utilizza ogni possibile fonte interna di energia elettrica in quantità enormi e dipende relativamente poco dalla fornitura da altri Paesi.

Ecco da dove il Piano D ottiene i suoi 50 kWh/gg/p di elettricità. Eolico: 8 kWh/gg/p (20 GW di media; 66 GW di picco) (più circa 400 GWh di stoccaggio mediante impianti di pompaggio). Solare FV: 3 kWh/gg/p. Incenerimento dei rifiuti: 1.3 kWh/gg/p. Idroelettrico: 0.2 kWh/gg/p. Moto ondoso: 2 kWh/gg/p. Maree: 3.7 kWh/gg/p. Nucleare: 16 kWh/gg/p (40 GW). "Cabone pulito": 16 kWh/gg/p (40 GW).

Per ottenere 8 kWh/gg/p di eolico occorre un incremento pari a 30 volte la potenza eolica installata al 2008. La Gran Bretagna si troverebbe così ad avere una quantità di apparecchiature e strutture per l'eolico tre volte superiore a quella che possiede ad oggi la Germania. Installare così tanta potenza eolica offshore in un periodo di 10 anni richiederebbe grosso modo 50 chiatte munite di gru.

Per ottenere 3 kWh/gg/p dal solare fotovoltaico occorrono 6 m^2 di pannelli a persona aventi un'efficienza del 20%. La maggior parte dei tetti esposti a sud dovrebbero venire completamente rivestiti di pannelli; in alternativa, potrebbe essere più economico e causare meno disagio alla Lega per la Salvaguardia dei Vecchi Edifici piantare molti di questi pannelli in campagna, nel modo tradizionale bavarese (figura 6.7, p. 46).

L'incenerimento dei rifiuti corrisponde a 1 kg al giorno a persona di rifiuti domestici (che rende 0.5 kWh/gg/p) e ad una quantità simile di rifiuti agricoli con una resa di 0.6 kWh/gg/p; l'idroelettricità ammonta a 0.2 kWh/gg/p, lo stesso quantitativo che otteniamo attualmente.

La potenza dal moto ondoso richiede 16 000 dispositivi per le onde in alto mare del tipo Pelamis occupanti 830 km della costa atlantica (si veda la mappa a p. 80).

La potenza dalle maree proviene da 5 GW di impianti a flusso di marea, 2 GW dello sbarramento del Severn e 2.5 GW di lagune di marea, che possono servire anche come sistemi di pompaggio.

Per ottenere 16 kWh/gg a persona di potenza elettro-nucleare occorrono 40 GW di impianti, il che significa grosso modo quadruplicare la "flotta" nucleare del 2007. Se producessimo 16 kWh/gg/p di potenza nucleare, ci ritroveremmo fra il Belgio, la Finlandia, la Francia e la Svezia, in termini di produzione pro-capite: Belgio e Finlandia producono ciascuna all'incirca 12 kWh/gg/p; Francia e Svezia 19 kWh/gg/p e 20 kWh/gg/p rispettivamente.

Per ottenere 16 kWh/gg/p di "carbone pulito" (40 GW), dovremmo prendere l'attuale flotta di centrali a carbone, che fornisce circa 30 GW, implementare un retrofit di sistemi di cattura del carbonio, che ridurrebbe la loro produzione a 22 GW, quindi costruire altri 18 GW di nuove centrali a carbone pulito. Questo livello di potenza dal carbone richiede un apporto di energia di circa 53 kWh/gg/p, vale a dire un contributo un po' più grande rispetto al tasso totale con cui attualmente bruciamo *tutti* i combustibili fossili presso le centrali elettriche, e ben al di sopra del livello che abbiamo stimato "sostenibile" nel Capitolo 23. Questo tasso di consumo del carbone fossile è circa tre volte l'attuale tasso di importazioni del medesimo (18 kWh/gg/p). Se non riaprissimo le miniere di carbone nel Regno Unito, questo piano avrebbe il 32% dell'energia elettrica nel Regno Unito dipendente dal carbone importato. La riapertura delle miniere di carbone del Regno Unito potrebbe fornire un apporto di energia di circa 8 kWh/gg/p; quindi, in entrambi i casi, il Regno Unito non sarebbe autosufficiente per quanto riguarda il carbone.

Una o più caratteristiche di questo piano vi sembra irragionevole, discutibile o sgradevole? Se è così, forse uno dei prossimi quattro piani è più di vostro gradimento.

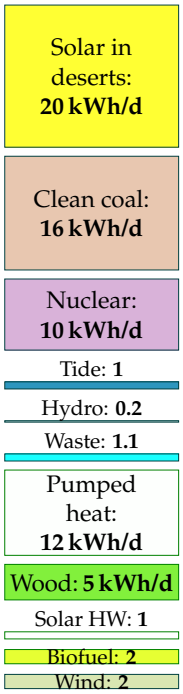


Figura 27.5. Piano N

Produrre un sacco di elettricità – Piano N

Il Piano N è quello "NIMBY" [Not In My Back Yard: non nel mio giardino dietro casa. (N.d.Tt.)], per la gente che non gradisce l'industrializzazione della campagna britannica mediante impianti di energia rinnovabile e che neppure vuole nuove centrali nucleari. Sveliamo il piano pezzo per pezzo.

In primo luogo, giriamo verso il basso tutte le manopole rinnovabili passando dalle impostazioni altissime nel Piano D a: eolico: 2 kWh/gg/p (5 GW di media); solare FV: 0; moto ondoso: 0; maree: 1 kWh/gg/p.

In questo modo ci siamo giocati 14 kWh/gg/p (35 GW a livello nazionale) abbattendo le fonti rinnovabili. (Non fraintendetemi! L'eolico è ancora otto volte maggiore rispetto ai suoi livelli del 2008).

Nel piano NIMBY, riduciamo il contributo del nucleare a 10 kWh/gg/p (25 GW) – una riduzione di 15 GW rispetto al Piano D, ma ancora un aumento sostanziale rispetto ai livelli attuali. 25 GW di nucleare li si potreb-

be, a mio parere, cacciare dentro i siti già esistenti, in modo da evitare l'imposizione su eventuali nuovi cortili. Ho lasciato il contributo del carbone pulito invariato a 16 kWh/gg/p (40 GW). Il contributo idroelettrico e della generazione di elettricità dall'incenerimento dei rifiuti rimane lo stesso del Piano D.

Dove andiamo a pescare i 50 GW extra? I NIMBY dicono: "non nel mio giardino dietro casa, ma in quello di qualcun altro". Stando così le cose, il Piano NIMBY paga altri Paesi per importare energia solare dai loro deserti per la somma di 20 kWh/gg/p (50 GW).

Questo piano richiede la creazione di cinque chiazze, ciascuna delle dimensioni di Londra (44 km di diametro) nel deserto trans-mediterraneo, riempiendole di centrali solari. Richiede, inoltre, sistemi di trasmissione affinché arrivino 50 GW di potenza fino al Regno Unito. L'attuale connessione elettrica ad alta tensione dalla Francia è in grado di fornire solo 2 GW di potenza. Pertanto il piano richiede un aumento di 25 volte della capacità di connessione elettrica dal continente. (O una soluzione equivalente per il trasporto di potenza – magari navi riempite di metanolo o di boro, che solchino i mari salpando dalle sabbie dei deserti).

Avendo meno energia eolica, il Piano B non ha bisogno di costruire in Gran Bretagna gli impianti di pompaggio supplementari di cui al Piano D, ma data la sua dipendenza dalla luce del sole, richiede ancora sistemi di stoccaggio da costruirsi in qualche luogo per immagazzinare l'energia fluttuante del sole. Sistemi di accumulo a sali fusi presso le centrali solari sono una possibilità. Potrebbe essere possibile anche attingere dai sistemi di pompaggio delle Alpi. Convertire l'energia elettrica in un combustibile immagazzinabile come il metanolo è un'altra opzione, sebbene le conversioni comportino perdite e quindi richiedano più centrali solari.

Questo piano ottiene il $32\% + 40\% = 72\%$ dell'elettricità del Regno Unito da altri Paesi.

Figura 27.6. Piano L

Produrre un sacco di elettricità – Piano L

Alcuni dicono: "noi non vogliamo il nucleare!" Come possiamo soddisfare queste persone? Forse dovrebbe essere compito di questo gruppo antinucleare persuadere il gruppo NIMBY a volere le energie rinnovabili nel cortile dietro casa, dopo tutto.

È possibile creare un piano senza nucleare prendendo il Piano D, mantenendo tutte quelle fonti di energia rinnovabili nel cortile dietro casa e facendo uno scambio diretto tra il nucleare e l'energia dal deserto. Come nel Piano N, la consegna di potenza generata nel deserto richiede un aumento consistente dei sistemi di trasmissione tra il Nord Africa e la Gran Bretagna; l'interconnessione Europa–Regno Unito dovrebbe essere aumentata dagli attuali 2 GW ad almeno 40 GW.

Ecco da dove il Piano L ottiene i suoi 50 kWh/gg/p di elettricità. Eolico: 8 kWh/gg/p (20 GW di media) (più circa 400 GWh di impianti di pompag-

gio associati per lo stoccaggio). Solare FV: 3 kWh/gg/p. Idroelettrico ed incenerimento dei rifiuti: 1.3 kWh/gg/p. Moto ondoso: 2 kWh/gg/p. Maree: 3.7 kWh/gg/p. "Carbone pulito": 16 kWh/gg/p (40 GW). Solare nei deserti: 16 kWh/gg/p (40 GW di media).

Questo piano importa il 64% dell'elettricità del Regno Unito da altri Paesi.

L'ho chiamato "Piano L" perché si allinea abbastanza bene con le politiche dei Liberal Democratici – almeno così era quando ho scritto questo capitolo a metà del 2007; di recente, hanno parlato di "indipendenza energetica reale per il Regno Unito" ed hanno annunciato una politica a zero emissioni di carbonio, in base alla quale la Gran Bretagna diverrebbe al netto *esportatrice* di energia; la loro politica non fornisce dettagli di come tali obiettivi verrebbero soddisfatti.

Produrre un sacco di elettricità – Piano G

Alcuni dicono: "non vogliamo il nucleare *e* non vogliamo il carbone!" Sembra un traguardo auspicabile, ma abbiamo bisogno di un piano, perché divenga raggiungibile. Lo chiamo "Piano G," [Green = Verde. (N.d.T.)], poiché credo che il Partito dei Verdi non voglia né il nucleare né il carbone; anche se penso che non tutti i Verdi vorrebbero il resto del piano. Greenpeace, lo so, *ama* l'eolico, così il Piano G è dedicato anche a loro, giacché di vento ne contiene *un sacco*.

Ho costruito il Piano G di nuovo a partire dal Piano D, dando un colpetto da 1 kWh/gg/p al contributo del moto ondoso (pompando denaro nella ricerca sulle onde ed aumentando l'efficienza del convertitore Pelamis) e facendo schizzare in su l'eolico, in modo che ora risulta quadruplicato (rispetto al Piano D) con 32 kWh/gg/p e fornisce il 64% di tutta l'energia elettrica. Questo significa un incremento pari a 120 volte gli attuali livelli della potenza eolica britannica. Nel quadro fornito da questo piano, l'energia eolica del *mondo intero* al 2008 è moltiplicata per 4 e tutto l'aumento è piazzato sulle isole britanniche o intorno ad esse.

L'immensa dipendenza del piano di G dalle fonti rinnovabili, in particolare quella eolica, crea difficoltà per il nostro metodo principale con cui gestiamo offerta e domanda, di fatto regolando la velocità di carica di milioni di batterie ricaricabili per il trasporto. Così nel piano G dobbiamo includere sostanziali ed ulteriori impianti di pompaggio, in grado di bilanciare le fluttuazioni dell'eolico su un orizzonte temporale di giorni. Impianti di pompaggio pari a 400 Dinorwig possono sostituire completamente il vento nel cullare la nazione per una durata di 2 giorni. Circa 100 dei grandi laghi e loch [sempre laghi sono, ma in gaelico – n.d.t.] della Gran Bretagna sarebbero richiesti per i sistemi di pompaggio associati per lo stoccaggio.

La fornitura di corrente elettrica nel Piano G risulta composta come segue. Eolico: 32 kWh/gg/p (80 GW di media) (più circa 4000 GWh di

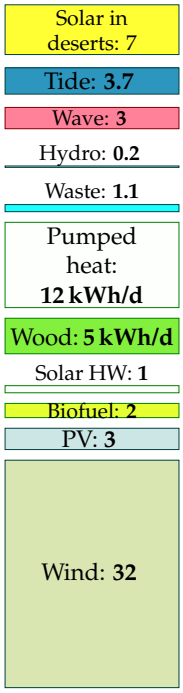


Figura 27.7. Piano G

impianti di pompaggio associati per lo stoccaggio). Solare fotovoltaico: 3 kWh/gg/p. Idroelettrico ed incenerimento dei rifiuti: 1.3 kWh/gg/p. Moto ondoso: 3 kWh/gg/p. Maree: 3.7 kWh/gg/p. Solare nei deserti: 7 kWh/gg/p (17 GW).

Questo piano ottiene il 14% della sua elettricità da altri Paesi.

Produrre un sacco di elettricità – Piano E

La E sta per "economia". Questo quinto piano fornisce una stima di quello che potrebbe accadere a occhio e croce in un mercato dell'energia libero, con un forte prezzo del carbonio. Su un campo di gioco a livello economico, dove un forte segnale che proviene dai prezzi previene le emissioni di CO_2, non ci si aspetta una soluzione diversificata, con una vasta gamma di potenze-costi, ci si aspetta più facilmente una soluzione economicamente ottimale che offra la potenza necessaria al più basso costo possibile. E quando il "carbone pulito" si trova testa a testa con il nucleare per quanto riguarda il prezzo, è il nucleare a vincere. (Alcuni ingegneri di un'azienda produttrice di elettricità nel Regno Unito mi hanno riferito che il capitale investito per le centrali elettriche standard a carbone *sporco* è di £1 mld a GW, più o meno quanto per il nucleare, ma il costo del capitale investito in potenza con il "carbone pulito", dove vanno inclusi la cattura e lo stoccaggio del carbonio, è di circa £2 mld a GW). Ritengo, inoltre, che l'energia solare nei deserti altrui perda contro il nucleare, una volta preso in considerazione il costo delle linee di trasmissione da 2000 km (anche se van Voorthuysen (2008) calcola che con uno sviluppo, da premio Nobel, della produzione di combustibili chimici mediante l'utilizzo di energia solare, il solare nei deserti raggiungerebbe la parità economica con il nucleare). Anche l'eolico off-shore perde contro il nucleare, ma ho assunto che i costi dell'eolico on-shore siano all'incirca gli stessi del nucleare.

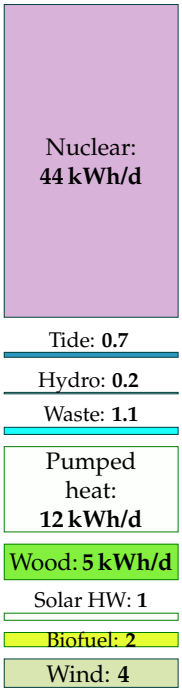


Figura 27.8. Piano E

Ecco da dove il Piano E ottiene i suoi 50 kWh/gg/p di elettricità. Eolico: 4 kWh/gg/p (10 GW di media). Solare FV: 0. Idroelettrico ed incenerimento dei rifiuti: 1.3 kWh/gg/p. Moto ondoso: 0. Maree: 0.7 kWh/gg/p. E nucleare: 44 kWh/gg/p (110 GW).

Questo piano presenta un incremento della nostra potenza elettro-nucleare pari a dieci volte i livelli del 2007. La Gran Bretagna ne avrebbe per 110 GW, ossia grosso modo il doppio della flotta nucleare francese. Ho incluso un piccolo quantitativo di potenza dalle maree poiché sono profondamente convinto che un impianto-laguna ben progettato sia in grado di competere con il nucleare.

Secondo tale piano, le importazioni energetiche della Gran Bretagna sono nulle (fatta eccezione per l'uranio, che, come si è detto in precedenza, per convenzione non è annoverato tra le importazioni).

Figura 27.9 mostra tutti e cinque i piani.

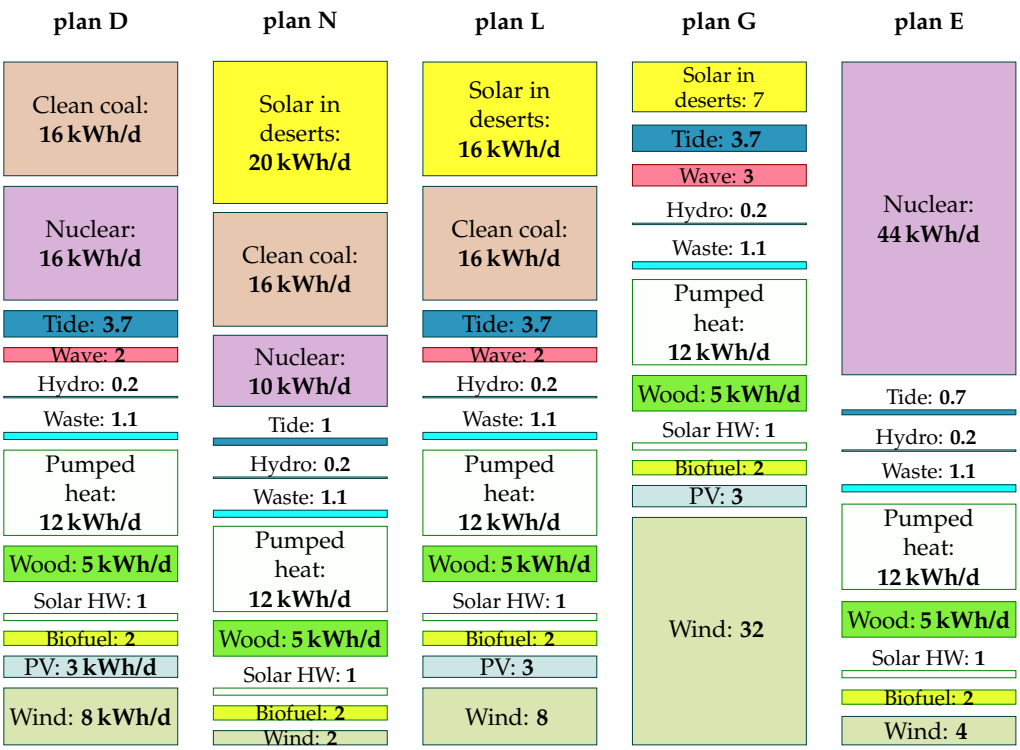


Figura 27.9. Tutti e cinque i piani.

Come si rapportano questi piani con la cattura del carbonio mediante suzione ed i viaggi aerei

In un mondo futuro dove l'inquinamento da carbonio avrà un prezzo adeguato, onde evitare cambiamenti climatici catastrofici, saremo interessati a qualsiasi combinazione di potenza in grado di mettere a basso costo il carbonio extra in un buco nel terreno. I sistemi di neutralizzazione del carbonio ci potrebbero permettere di continuare a volare ai livelli del 2004 (finché dura il petrolio). Nel 2004, le emissioni medie di CO_2 nel Regno Unito, dovute ai voli aerei, sono state pari a circa 0.5 t CO_2 all'anno per persona. Contabilizzando per intero l'impatto serra del viaggiare in aereo, forse le emissioni effettive sono state pari a circa 1 t CO_2e all'anno per persona. Ora, in tutti e cinque i piani ho assunto che un ottavo del Regno Unito fosse dedicato alla produzione di colture energetiche e che queste venissero poi utilizzate per il riscaldamento o per la cogenerazione. Se, invece, tutte queste colture venissero inviate direttamente a centrali elettriche munite di sistemi per la cattura e lo stoccaggio del carbonio – gli impianti a "carbone pulito", che caratterizzano tre dei piani – allora, la quantità di CO_2 catturata in più sarebbe di circa 1 t di CO_2 all'anno per persona. Se in aggiunta gli inceneritori di rifiuti urbani e agricoli fossero situati presso le centrali a carbone pulito in modo che possano condivi-

1 t CO_2e significa emissioni di gas ad effetto serra equivalenti ad una tonnellata di CO_2.

dere la medesima canna fumaria, forse il totale catturato potrebbe salire a 2 t CO_2 all'anno per persona. Questa disposizione avrebbe dei costi aggiuntivi: biomassa e rifiuti potrebbero dover essere trasportati più lontano, il processo di cattura del carbonio richiederebbe una frazione significativa dell'energia dei raccolti ed andrebbe perso il riscaldamento degli edifici, che dovrebbe essere sostituito da un maggior numero di pompe di calore. Ma, se la neutralizzazione del carbonio è il nostro obiettivo, varrebbe la pena pianificare per il futuro cercando di ubicare nuove centrali a carbone pulito insieme agli inceneritori di rifiuti in regioni vicine alle eventuali piantagioni per biomasse.

"Tutti i piani sono assurdi!"

Se non vi piacciono questi piani, la cosa non mi sorprende. Sono d'accordo che ci sia qualcosa di sgradevole in ognuno di essi. Sentitevi liberi di fare un altro piano che sia più di vostro gradimento. Ma assicuratevi che i conti tornino!

Forse concluderete che un piano per essere efficace debba comprendere meno consumo di energia pro capite. Potrei essere d'accordo, ma è una politica difficile da far digerire – ricordate la risposta di Tony Blair (p. 246), quando qualcuno gli suggerì che avrebbe dovuto volare all'estero per le vacanze meno frequentemente!?

In alternativa, potreste concludere che abbiamo una densità di popolazione eccessivamente elevata e che un piano valido richieda meno persone. Di nuovo, una politica difficile da far digerire.

Note ed approfondimenti

p.

228 *Incenerire 1 kg di rifiuti rende grosso modo 0.5 kWh di elettricità.*
Il valore energetico dei rifiuti solidi urbani è di circa 2.6 kWh per kg; gli impianti che bruciano rifiuti producono elettricità con un'efficienza pari a circa il 20%. Fonte: guida turistica della SELCHP.

229 *Figura 27.3.* Dati dell'Eurostat, `www.epa.gov` e `www.esrcsocietytoday.ac.uk/ESRCInfoCentre/`.

233 *le politiche dei Liberal Democratici.* Si veda `www.libdems.org.uk`: [`5os7dy`], [`yrw2oo`].

28 I costi nella giusta prospettiva

Un piano su di una cartina

Vorrei cercare di chiarire la portata dei piani del capitolo precedente, mostrando la mappa della Gran Bretagna e disponendovi sopra un sesto piano. Questo sesto piano si trova a metà strada tra i primi cinque, sicché lo chiamerò piano M, quello "mediano" (figura 28.1).

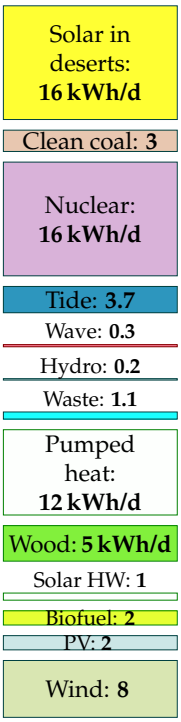


Figura 28.1. Piano M

Le aree ed i costi grezzi di un tale insieme di installazioni e servizi sono riportati nella tabella 28.3. Per semplicità, i costi finanziari sono stimati utilizzando i prezzi correnti per strutture comparabili; in molti casi si tratta di semplici prototipi. Possiamo aspettarci che molti dei prezzi diminuiscano sensibilmente. I costi grezzi qui riportati sono quelli di costruzione e non includono i costi di gestione o di disattivazione/smantellamento. I costi "per persona" si trovano dividendo quello totale per 60 milioni. Si prega di ricordare che questo non è un libro di economia – che richiederebbe altre 400 pagine! Vengono fornite queste stime dei costi solo per dare un'indicazione *di massima* del prezzo che dovremmo aspettarci di vedere sulla fattura di un piano dove i conti tornano.

Vorrei sottolineare che non sto sostenendo questo piano in particolare che include diverse caratteristiche che io, in qualità di ipotetico dittatore della Gran Bretagna, non selezionerei. Ho volutamente incluso tutte le tecnologie disponibili, in modo che possiate mettere alla prova i vostri piani personali utilizzando altri mix.

Facciamo degli esempi. Se si dice: "il fotovoltaico sta divenendo troppo costoso; mi piacerebbe, invece, un piano con più potenza dal moto ondoso", si può vedere come metterlo in pratica: è necessario aumentare i parchi marini otto volte. Se le sedi dei parchi non sono di vostro gradimento, non esitate a spostarli (ma dove?). Tenete a mente che metterne un maggior numero in mare aperto aumenterà i costi. Se si desidera un minor numero di parchi eolici, nessun problema – basta specificare quale delle altre tecnologie si vuole al loro posto. È possibile sostituire cinque dei parchi eolici da 100 km^2 con l'aggiunta di un'ulteriore centrale nucleare da 1 GW, ad esempio.

Si può pensare che questo piano (come ciascuno dei cinque piani nel capitolo precedente) dedichi irragionevolmente grande spazio ai biocarburanti. Bene: si può concludere, quindi, che la domanda di combustibili liquidi per il trasporto debba essere ridotta al di sotto dei 2 kWh al giorno per persona che questo piano presuppone, oppure che i combustibili liquidi debbano essere prodotti in altra maniera.

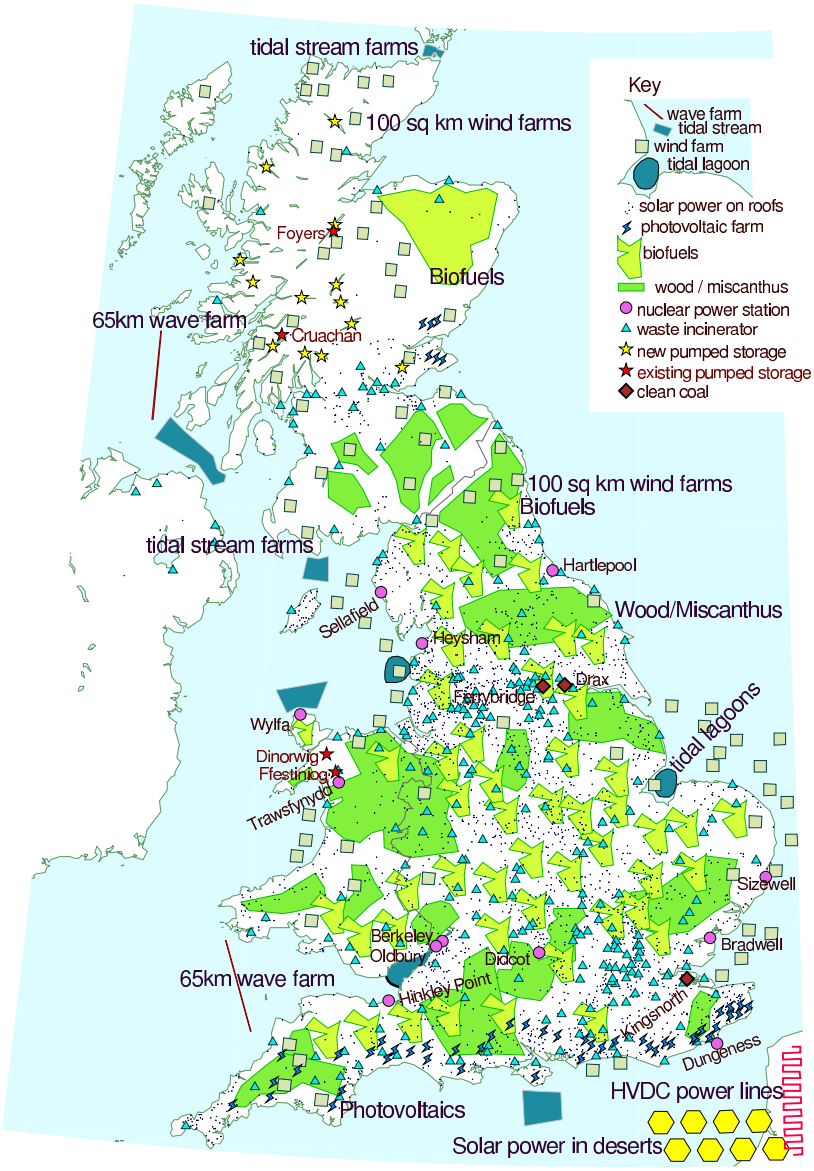


Figura 28.2. Un piano dove i conti tornano, per Scozia, Inghilterra e Galles. I quadrati grigio-verde sono parchi eolici. Ciascuno ha le dimensioni di 100 km^2 e viene mostrato in scala.
Le linee rosse nel mare sono i parchi a onde marine, mostrati in scala.
I poligoni blu chiaro a forma di saetta: parchi solari fotovoltaici – 20 km^2 ciascuno, mostrati in scala.
I poligoni blu spigolosi in mare: parchi per il flusso di marea.
Le chiazze blu, sempre in mare (Blackpool e Wash): lagune per le maree.
Le porzioni di territorio in verde chiaro: boschi e boschetti a breve rotazione (in scala).
Le aree giallo-verdi: biocarburanti (in scala).
I piccoli triangoli azzurri: impianti per l'incenerimento dei rifiuti (non in scala).
I grossi diamanti marroni: centrali a carbone pulito, con la co-combustione di biomassa e la cattura e stoccaggio del carbonio (non in scala).
I puntini viola: centrali nucleari (non in scala) – 3.3 GW di produzione media in ciascuno dei 12 siti.
Gli esagoni gialli che coprono il canale della Manica: impianti di solare a concentrazione nei deserti remoti (in scala, 335 km^2 cad.). La greca rosa sulla costa della Francia rappresenta nuove linee HVDC, 2000 km di lunghezza, che convogliano 40 GW dai deserti remoti verso il Regno Unito.
Le stelle gialle in Scozia: nuovi impianti di stoccaggio tramite pompaggio.
Le stelle rosse: impianti di pompaggio esistenti.
I puntini blu: pannelli solari per l'acqua calda su tutti i tetti.

	Capacità	Costo grezzo totale	Costo grezzo a persona	Potenza media erogata
52 parco eolico onshore: 5200 km^2	35 GW	£27 mld – basato sul parco eolico di Lewis	£450	4.2 kWh/gg/p
29 parco eolico offshore: 2900 km^2	29 GW	£36 mld – basato su Kentish Flats, & includendo £3bn investititi nelle chiatte per il sollevamento.	£650	3.5 kWh/gg/p
Accumulo mediante pompaggio: 15 impianti simili a Dinorwig	30 GW	£15 mld	£250	
Parchi fotovoltaici: 1000 km^2	48 GW	£190 mld – basato su Solarpark in Baviera	£3200	2 kWh/gg/p
Pannelli per il solare termico: 1 m^2 di tetto ricoperto da pannelli a persona. (60 km^2 in totale)	2.5 GW(th) di media	£72 mld	£1200	1 kWh/gg/p
Inceneritori per rifiuti: 100 nuovi inceneritori da 30 MW	3 GW	£8.5 mld – basato su SELCHP	£140	1.1 kWh/gg/p
Pompe di calore	210 GW(th)	£60 mld	£1000	12 kWh/gg/p
Parco a onde marine – 2500 Pelamis, 130 km di mare	1.9 GW (0.76 GW di media)	£6 mld?	£100	0.3 kWh/gg/p
Sbarramento del Severn: 550 km^2	8 GW (2 GW di media)	£15 mld	£250	0.8 kWh/gg/p
Lagune di marea: 800 km^2	1.75 GW di media	£2.6 mld?	£45	0.7 kWh/gg/p
Flusso di marea: 15 000 turbine – 2000 km^2	18 GW (5.5 GW di media)	£21 mld?	£350	2.2 kWh/gg/p
Nucleare: 40 centrali	45 GW	£60 mld – basato su Olkiluoto, Finlandia	£1000	16 kWh/gg/p
Carbone pulito	8 GW	£16 mld	£270	3 kWh/gg/p
Solare a concentrazione nei deserti: 2700 km^2	40 GW di media	£340 mld – basato su Solúcar	£5700	16 kWh/gg/p
Porzione di territorio in Europa occupata dall'istallazione di 1600 km di linee HVDC: 1200 km^2	50 GW	£1 mld – assumendo un costo della terra pari a £7500 per ettaro	£15	
2000 km di linee HVDC	50 GW	£1 mld – basato sulle stime del German Aerospace Center	£15	
Biocarburanti: 30 000 km^2		(costo non stimato)		2 kWh/gg/p
Legna/Miscanthus: 31 000 km^2		(costo non stimato)		5 kWh/gg/p

Tabella 28.3. Aree di terra e di mare richieste dal piano M e costi di massima. I costi con un punto di domanda riguardano quelle tecnologie i cui prototipi non permettono ancora di rendere disponibile un costo preciso. "1 GW(th)" indica un GW di potenza termica.

Costo del passaggio dai combustibili fossili alle fonti rinnovabili

Ogni parco eolico costa qualche milione di sterline, perché venga costruito e fornisca alcuni megawatt. Secondo una stima davvero molto approssimativa del 2008, l'installazione di un watt di capacità costa una sterlina; un chilowatt costa 1000 sterline, un megawatt di eolico ne costa un milione; un gigawatt di nucleare un miliardo, forse due. Altre fonti rinnovabili sono più costose. Noi (il Regno Unito) attualmente consumiamo una potenza totale di circa 300 GW, la maggior parte dei quali è a base di combustibili fossili. Pertanto si può anticipare che un passaggio importante dai combustibili fossili alle fonti rinnovabili e/o nucleari necessita di circa 300 GW di fonti rinnovabili e/o nucleari e quindi un costo approssimativo di £300 mld. I costi grezzi nella tabella 28.3 arrivano a £870 mld, con gli impianti solari che dominano il totale – il costo del fotovoltaico è di £190 mld e quello del solare a concentrazione £340 mld. Entrambi questi costi potrebbero anche scendere drasticamente man mano che si impara dalla pratica. Un rapporto del governo fatto trapelare dal Guardian nell'agosto 2007 stima che il raggiungimento del "20% entro il 2020" (cioè il 20% di tutta l'energia da fonti rinnovabili, che richiederebbe un aumento di potenza rinnovabile pari a 80 GW) potrebbe costare "fino a £22 mld" (vale a dire in media oltre £1.7 mld all'anno). Anche se questa stima è inferiore agli 80 miliardi di sterline tche la regola empirica che ho appena menzionato avrebbe suggerito, gli autori del rapporto divulgato sembrano vedere £22 mld come un costo "irragionevole", preferendo un obiettivo pari a solo un 9% di energie rinnovabili. (Un'altra motivazione che forniscono per giustificare la loro antipatia nei confronti dell'obiettivo del "20% entro il 2020" è che il conseguente risparmio di gas a effetto serra "rischierebbe di rendere il sistema di scambio delle emissioni dell'UE ridondante". Un pensiero terrificante!).

Altre cose che costano un miliardo

I miliardi sono cifre grandi e non è facile prenderci confidenza. Per cercare di dare un aiuto a mettere in prospettiva il costo di prendere a calci i combustibili fossili, andiamo ora ad elencare alcune altre cose che vengono a costare miliardi di sterline, ovvero miliardi all'anno. Esprimerò molte di queste spese anche "per persona", dividendo il totale per una popolazione adeguata.

Forse la quantità più rilevante con cui confrontarsi sono i soldi che *già* spendiamo per l'energia ogni anno. Nel Regno Unito, i soldi spesi per l'energia da parte degli utenti finali è di £75 mld all'anno e il valore di mercato complessivo di tutta l'energia consumata è di £130 mld all'anno. Pertanto l'idea di spendere £1.7 mld all'anno in investimenti per le infrastrutture energetiche future non sembra affatto irragionevole – è inferiore al 3% della nostra spesa corrente in termini di energia!

Un altro buon paragone da fare è con la nostra spesa annuale per l'assicurazione: alcuni degli investimenti che abbiamo bisogno di fare offrono un ritorno incerto – proprio come le assicurazioni. Individui ed imprese britanniche spendono £90 mld all'anno in assicurazioni.

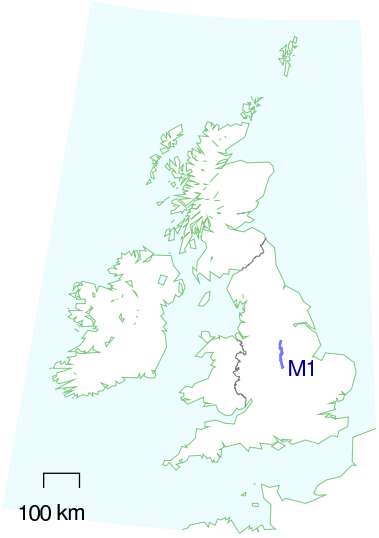


Figura 28.4. L'autostrada M1, tra le uscite 21 e 30.

Sussidi

£56 mld in 25 anni: il costo di smantellamento delle centrali e degli impianti di produzione degli armamenti nucleari del Regno Unito. Questo il dato del 2004, nel 2008 la cifra ha toccato i £73 mld (£1200 a persona nel Regno Unito). [6eoyhg]

Trasporti

£4.3 mld: il costo del Terminal 5 di Londra Heathrow. (£72 a persona nel Regno Unito).
£1.9 mld: il costo di ampliamento di 91 km della M1 (dallo svincolo 21 al 30, figura 28.4). [yu8em5]. (£32 a persona nel Regno Unito).

Eventi speciali

CIl costo delle Olimpiadi di Londra 2012: £2.4 mld; no, mi sono sbagliato, £5 mld [3x2cr4]; o forse £9 mld [2dd4mz]. (£150 a persona nel Regno Unito).

Affari come al solito

£2.5 mld/anno: profitti di Tesco (annunciati per il 2007). (£42 all'anno per persona nel Regno Unito).
£10.2 mld/anno: spesi dai britannici in cibo che comprano ma non mangiano. (£170 all'anno per persona nel Regno Unito).
£11 mld/anno: profitti della BP (2006).
£13 mld/anno: profitti dela Royal Dutch Shell (2006).
$40 mld/anno: profitti della Exxon (2006).
$33 mld/anno: spesa mondiale in profumi e prodotti estetici.
$700 mld all'anno: spese USA per le importazioni di petrolio (2008). ($2300 all'anno per persona negli Stati Uniti).

Affari di Stato come al solito

£1.5 mld: il costo dei lavori di ristrutturazione degli uffici del Ministero della Difesa. (Private Eye No. 1176, 19 gennaio 2007, p. 5). (£25 a persona nel Regno Unito).
£15 mld: il costo di introduzione nel Regno Unito del sistema Carta d'Identità [7vlxp]. (£250 a persona nel Regno Unito).

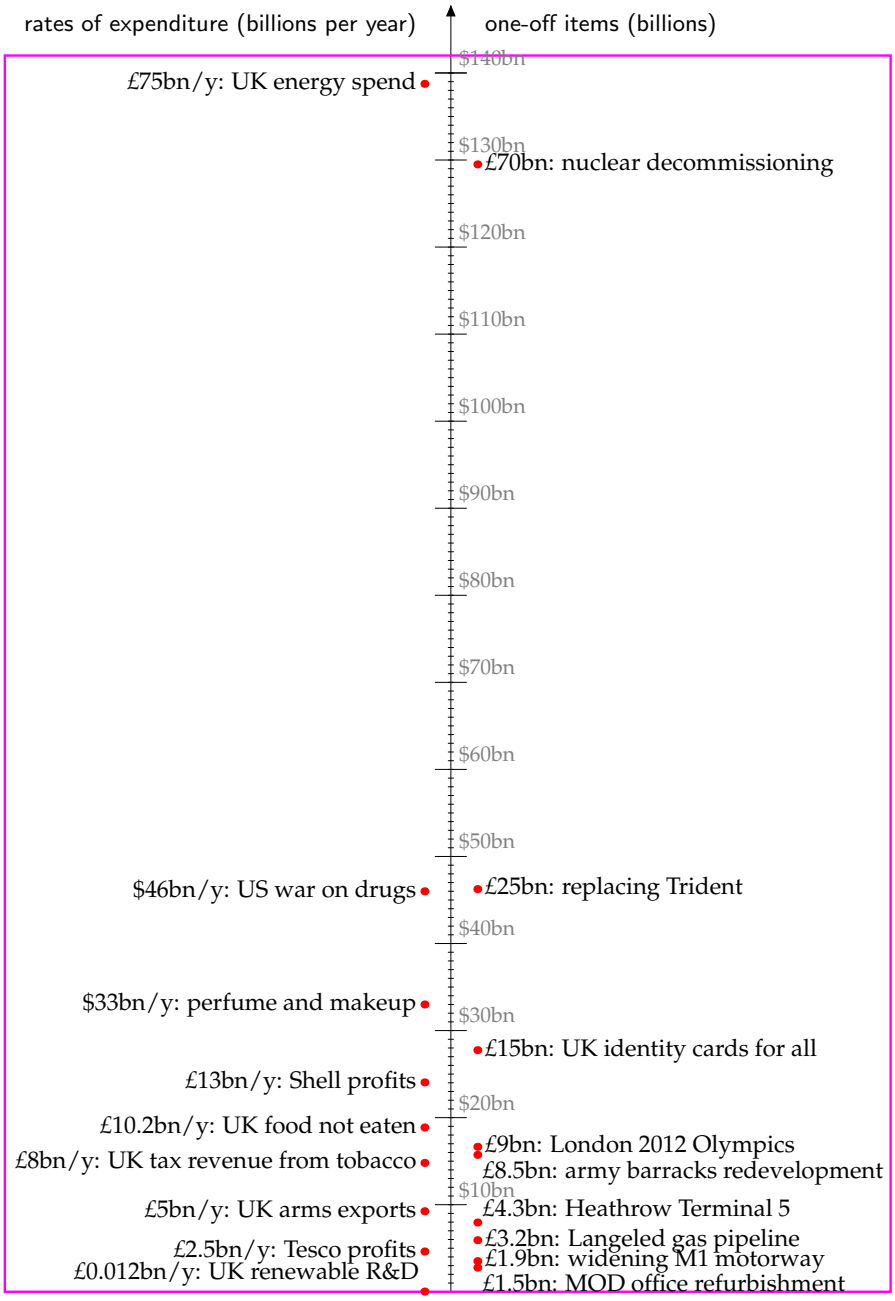


Figura 28.5. Cose che macinano miliardi. La scala nel centro dispone di tacche grandi ogni 10 miliardi di dollari e piccole ogni intervallo da 1000 milioni.

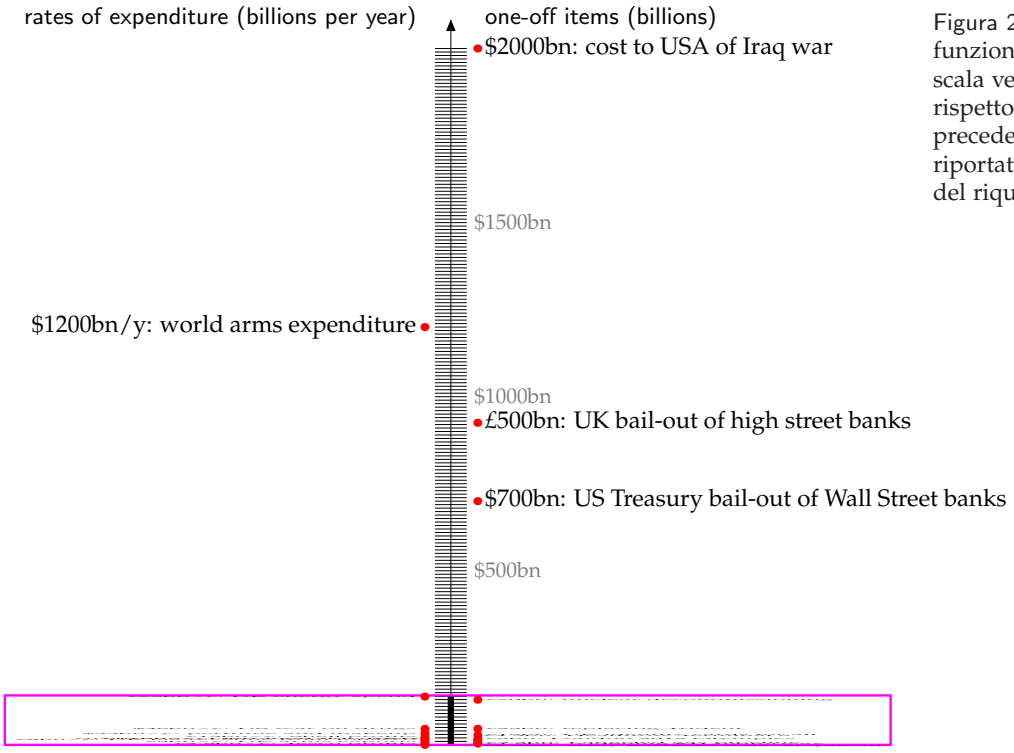


Figura 28.6. Un paio di altre cose che funzionano macinando miliardi. La scala verticale è schiacciata 20 volte rispetto a quella dei dati mostrati in precedenza, in figura 28.5, e qui riportati nella nuova scala all'interno del riquadro color magenta.

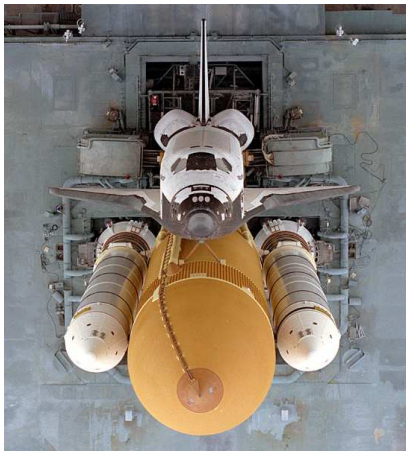
Piani per il futuro

£3.2 mld: il costo del gasdotto Langeled, impiegato per spedire il gas dai produttori norvegesi alla Gran Bretagna. La capacità del gasdotto è di 20 miliardi di m^3 all'anno, corrispondente ad una potenza di 25 GW. [6x4nvu] [39g2wz] [3ac8sj]. (£53 a persona nel Regno Unito).

Tasse sul tabacco e giochi correlati

£8 mld/anno: introiti annuali dalle tasse sul tabacco nel Regno Unito [y7kg26]. (£all'anno per persona nel Regno Unito). L'Unione Europea spende quasi 1 miliardo di euro l'anno per sovvenzionare la coltivazione del tabacco. www.ash.org.uk

$46 mld/anno: costo annuale della "Guerra alla droga" negli Stati Uniti [r9fcf] ($150 all'anno per persona negli USA).



Spazio

$1.7 mld: il costo di uno shuttle. ($6 per persona negli USA).

Banche

$700 mld: nell'ottobre 2008, il Governo degli Stati Uniti ha impegnato $700 mld per salvare Wall Street e...
£500 mld: il Governo del Regno Unito ha impegnato £500 mld per salvare le banche britanniche.

Apparati militari

£5 mld all'anno: esportazioni di armi dal Regno Unito (£83 all'anno a persona nel Regno Unito), di cui £2.5 mld verso il Medio Oriente e £1 mld in Arabia Saudita. Fonte: Observer, 3 Decembre 2006.
£8.5 mld: costo di riqualificazione delle caserme a Aldershot e nella piana di Salisbury. (£140 a persona nel Regno Unito).
£3.8 mld: il costo di due nuove portaerei (£63 a persona nel Regno Unito). `news.bbc.co.uk/1/low/scotland/6914788.stm`
$4.5 mld all'anno: il costo di non-fabbricazione degli armamenti nucleari – il bilancio del Dipartimento per l'Energia statunitense prevede lo stanziamento di almeno $4.5 mld all'anno per attività di "gestione responsabile delle scorte" al fine di mantenere la riserva nucleare *senza* che si compiano test nucleari e *senza* che si producano su larga scala nuove armi. ($15 all'anno per persona in America).
£10–25 mld: costo per sostituire Trident, il sistema di armamento nucleare britannico. (£170–420 a persona nel Regno Unito) [`ysncks`].
$63 mld: donazioni dall'America in "aiuti militari" (i.e. armi) al Medio Oriente in 10 anni – per circa la metà ad Israele ed il resto agli Stati Arabi. [`2vq59t`] ($210 a persona in USA).
$1200 mld all'anno: spesa mondiale in armamenti [`ym46a9`]. ($200 all'anno a persona nel mondo).
$2000 mld o più: il costo, per gli Stati Uniti, della [`99bpt`] guerra in Iraq secondo il premio Nobel per l'economia, Joseph Stiglitz. ($7000 a persona in America).

Secondo il Rapporto Stern, il costo globale per evitare i pericolosi connessi ai cambiamenti climatici (agendo ora) sarebbe pari a $440 mld l'anno ($440 all'anno per persona, se equamente suddiviso tra il miliardo di persone più ricche). Nel 2005, il Governo degli Stati Uniti ha speso solo $480 mld in guerre e preparazione alla guerra. La spesa militare complessiva dei 15 Paesi che più spendono in tal senso è stata di 840 miliardi di dollari.

*Spese che **non** macinano miliardi*

£0.012 mld all'anno: l'elemento più piccolo tra quelli visualizzati in figura 28.5 è l'investimento annuale del Governo britannico in ricerca e sviluppo delle energie rinnovabili. (£0.20 a persona nel Regno Unito, all'anno).

Note ed approfondimenti

p.

238 *Figura 28.2.* Ho supposto che i parchi solari fotovoltaici abbiano una potenza per unità di superficie di 5 W/m^2, la stessa del parco in Baviera a p. 46, di modo che ogni parco sulla mappa eroga 100 MW in media. La produzione media totale ammonterebbe a 5 GW, il che richiede circa 50 GW di potenza di picco (che è 16 volte la capacità fotovoltaica della Germania nel 2006).
Gli esagoni gialli rappresentano il solare a concentrazione ed hanno una potenza media di 5 GW ciascuno; ci vogliono due di questi esagoni per alimentare una delle "chiazze" del Capitolo 25.

240 *Un rapporto del Governo fatto trapelare dal Guardian...* il report pubblicato dal Guardian il 13 Agosto 2007, dice che [2bmuod] "i funzionari governativi hanno segretamente informato i ministri che la Gran Bretagna non ha neppure la remota speranza di avvicinarsi al nuovo obiettivo per le energie rinnovabili stabilito dall'Unione Europea e firmato da Tony Blair in primavera - ed hanno suggerito di trovare il modo per svicolare tirandosi fuori".
Il documento fatto trapelare è consultabile qui [3g8nn8].

241 *...profumi...* Fonte: Worldwatch Institute
www.worldwatch.org/press/news/2004/01/07/

244 *...guerre e preparazione alla guerra ...* www.conscienceonline.org.uk

– *investimenti del Governo in ricerca e sviluppo delle energia rinnovabili.* Nel 2002–3, l'impegno del Governo UK per la ricerca e lo sviluppo nel campo delle energie rinnovabili era di £12.2 mln. Fonte: House of Lords Science and Technology Committee, 4th Report of Session 2003–04. [3jo7q2]
Comparativamente piccolo è lo stanziamento del Governo per il Low Carbon Buildings Programme, £0.018 mld/anno divisi tra eolico, biomasse, solare termico/FV, pompe di calore geo-termiche, mini-idroelettrico e micro-cogenerazione.

29 Cosa fare ora

Se non agissimo adesso – non in qualche altro momento, ma adesso – queste conseguenze disastrose saranno irreversibili. Quindi non c'è niente di più serio o urgente che mostrare la via da seguire.

Tony Blair, 30 ottobre 2006

un po' impraticabile effettivamente...

Tony Blair, due mesi dopo, rispondendo al suggerimento di essere lui a *mostrare* la via da seguire evitando di volare alle Barbados per andare in vacanza.

Quello che dovremmo fare dipende in parte dalla nostra motivazione. A p. 6 abbiamo discusso tre motivazioni per abbandonare i combustibili fossili: la fine di questi a buon mercato; la messa in sicurezza del loro approvvigionamento; e il cambiamento climatico. Supponiamo come prima cosa di avere la motivazione del cambiamento climatico – vogliamo ridurre radicalmente le emissioni di carbonio. (Chiunque non creda nel cambiamento climatico puó saltare questa sezione e riunirsi a tutti noi a p. 249.)

Cosa fare contro l'inquinamento da carbonio

Non siamo ancora sulla strada che porta verso un futuro senza carbonio. Non stanno avvenendo investimenti a lungo termine. Le società che sviluppano soluzioni per la cattura del carbonio non stanno prosperando, anche se il consiglio degli esperti del clima e dell'economia è che l'aspirazione dell'anidride carbonica dall'atmosfera sarà probabilmente necessaria, per evitare pericolosi cambiamenti climatici. Il carbonio non viene catturato neppure in una centrale a carbone (fatta eccezione per un piccolo impianto pilota in Germania) [dopo la pubblicazione del libro nel marzo 2011 in Italia è stato inaugurato a Brindisi un impianto pilota per la cattura della CO_2 nella centrale Enel di Brindisi. (N.d.T.)].

Perché questo?

Il problema principale è che il prezzo da pagare per chi inquina emettendo carbonio non è calcolato correttamente. E niente fa pensare che verrà fissato in un futuro prossimo. Quando dico "correttamente", intendo che il prezzo da pagare per l'emissione dell'anidride carbonica dovrebbe essere abbastanza grande da fare in modo che ogni centrale a carbone funzionante abbia un impianto di cattura al suo interno.

La soluzione al problema del cambiamento climatico è un argomento complesso, ma in due parole, ecco la soluzione: il prezzo da pagare per l'anidride carbonica emessa deve essere tale per cui le persone *smettano di*

bruciare carbone senza impianti di cattura. Gran parte della soluzione è contenuta in questa misura, perché, il carbone sarà il principale combustibile fossile disponibile sul lungo termine. (Cercare di ridurre le emissioni da petrolio e gas è di secondaria importanza, perché l'estrazione di entrambe è previsto che finirà nei prossimi cinquanta anni).

Quindi che cosa dovrebbero fare i politici? Devono assicurarsi che tutte le centrali a carbone abbiano un impianto di cattura. Il primo passo verso il raggiungimento di questo obiettivo è quello che i governi finanzino un progetto dimostrativo su larga scala per selezionare la migliore tecnologia di cattura e di stoccaggio del carbonio; il secondo che i politici cambino le normative che regolano la vita delle centrali in modo che la tecnologia così perfezionata sia adottata dovunque. Il mio semplice suggerimento per questo secondo passo è di approvare una legge che dica che – da una certa data in poi – *tutte le centrali a carbone devono installare sistemi per la cattura del carbonio*. Comunque, la maggior parte dei politici eletti nelle democrazie sembra pensare che il modo per chiudere la porta della stalla, sia quella di creare un mercato di permessi che consenta ai buoi di non fuggire. In ogni caso, se accettassimo il dogma che il problema del cambiamento climatico deve essere risolto dal mercato, qual è la via maestra che ci assicura di raggiungere il nostro semplice obiettivo – ovvero, tutte le centrali a carbone con sistemi per la cattura della CO_2? Ebbene, potremmo girarci in tondo con l'istituzione di una borsa del carbonio – scambio di certificati che permettono l'emissione di carbonio con quelli che ne attestano la cattura, in questo modo i certificati del valore di una tonnellata di carbonio catturata si convertono in altrettanti diritti di emissione di pari quantità. Tuttavia, i proprietari delle centrali a carbone investirebbero in impianti di cattura e stoccaggio solo se fossero convinti che il prezzo del carbonio salga abbastanza in modo che gli impianti si ripaghino da soli. Gli esperti affermano che un prezzo garantito, sul lungo termine, di \$100 per tonnellata di CO_2 sarebbe sufficiente.

Quindi i politici devono decidere riduzioni delle emissioni di CO_2 su un orizzonte temporale lungo e in quantità tale che che gli investitori si convincano che il prezzo del carbonio si stabilizzerà perlomeno intorno al prezzo di \$100 per tonnellata di CO_2. In maniera alternativa, potrebbero mettere all'asta dei permessi di emissione di carbonio a partire da un prezzo minimo fissato. Un'altro modo ancora, potrebbe essere che i governi garantissero gli investimenti [in soluzioni per la cattura del carbonio] impegnandosi, in ogni caso, a riscattare i certificati del carbonio catturato al prezzo [minimo] di \$100 per tonnellata di CO_2.

Mi chiedo, però, se non sia più intelligente chiudere direttamente la porta della stalla, piuttosto che giocherellare con un mercato internazionale che mostra solo l'*intenzione* di farlo.

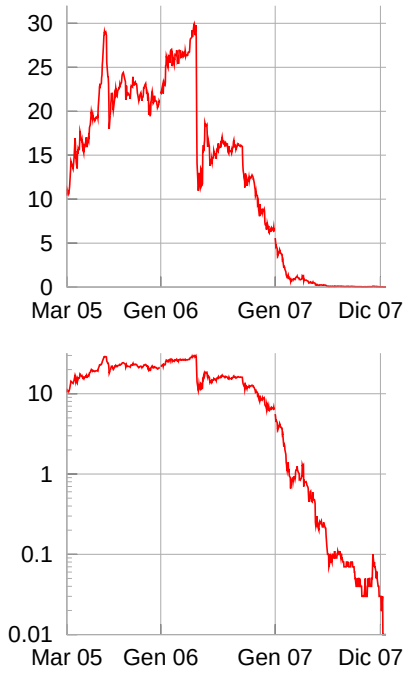


Figura 29.1.
Ecco un bel passo avanti! Il prezzo, in euro, di una tonnellata di CO_2 nel primo periodo del piano europeo di quotazione delle emissioni. Fonte: `www.eex.com`.

La politica energetica britannica non è affatto all'altezza. Non sarà in grado di garantire la sicurezza. Non sarà in grado di rispondere

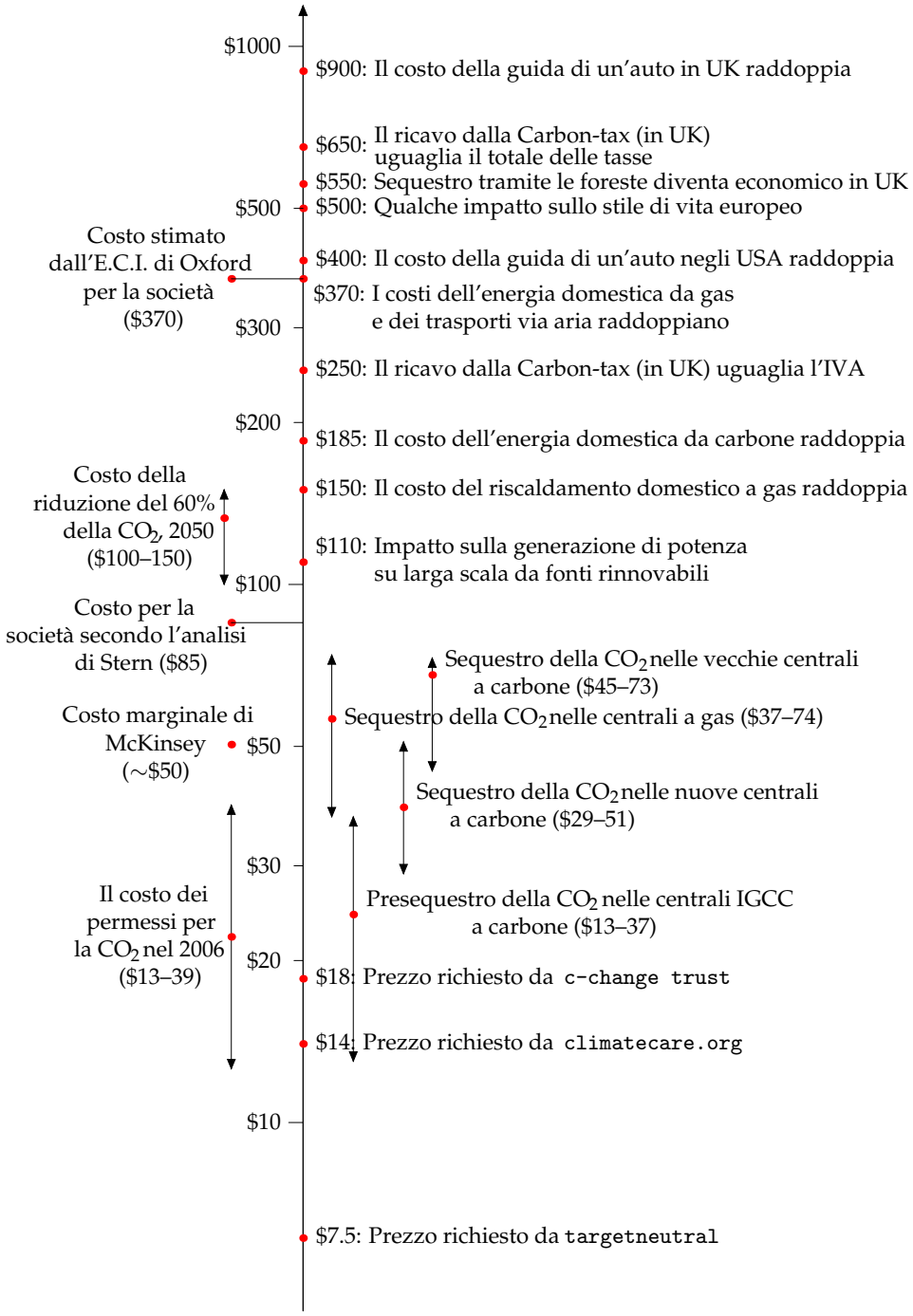


Figura 29.2. Che prezzo dovrebbe avere la CO_2 per portare la società a fare cambiamenti significativi nell'inquinamento da CO_2 ?
Il diagramma mostra i costi per tonnellata di anidride carbonica ai quali particolari investimenti diventerebbero economici, o per cui particolari comportamenti verrebbero significativamente intaccati, immaginando che un impatto importante sulle attività come volare e andare in auto si abbia se il costo del carbonio raddoppiasse il costo dell'attività.
Al crescere del costo tra $20–70 per tonnellata, la CO_2 diventerebbe sufficientemente costosa da rendere economicamente sensata l'aggiunta del sequestro del carbonio a ogni centrale nuova e vecchia.
Un prezzo di $110 per tonnellata trasformerebbe i progetti di produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili su larga scala che attualmente costano 3p [pence, un centesimo della sterlina britannica. (N.d.T.)] per kWh in più del gas in progetti fattibili finanziariamente. Per esempio, lo sbarramento (progettato) sul Severn produrrebbe una potenza dalle maree con un costo di 6p per kWh, che sono 3.3p sopra al prezzo tipico di vendita di 2.7p per kWh; se ogni 1000 kWh prodotto dallo sbarramento evitasse una ton di inquinamento di CO_2 ad un valore di £60 per ton, lo sbarramento si pagherebbe molto più che da solo.
A $150 per tonnellata, gli utilizzatori domestici di gas si accorgerebbero del costo del carbonio nelle loro bollette.
Un prezzo di $250 per tonnellata incrementerebbe il costo effettivo di un barile di petrolio di $100.
A $370, l'inquinamento da carbonio costerebbe abbastanza da ridurre significativamente la propensione delle persone a volare.
A $500 per tonnellata, l'europeo medio che non cambia il proprio stile di vita spenderebbe il 12% delle sue entrate nei costi del carbonio del volare, del guidare e del riscaldare le proprie case con il gas.
E a $900 per tonnellata, il costo del carbonio dell'andare in giro in auto sarebbe degno di nota.

ai nostri impegni sul cambiamento climatico. Risponde a malapena a quello che i paesi più poveri del mondo hanno bisogno.

Lord Patten of Barnes, Presidente del gruppo di lavoro
dell'università di Oxford
sull'energia e il cambiamento climatico, 4 giugno 2007.

Cosa fare per l'approvvigionamento energetico?

Avanziamo ora nella nostra lista motivazioni, e ipotizziamo di voler smettere l'uso dei combustibili fossili per motivi di sicurezza energetica.

Cosa dovremmo pensare per favorire lo sviluppo dell'approvvigionamento di fonti energetiche non fossili e il miglioramento dell'efficienza? Un atteggiamento possibile è quello di dire: "Lasciate fare al mercato. Mano a mano che i combustibili fossili diventano costosi, le fonti rinnovabili e l'energia nucleare diventeranno sempre più economici, e il consumatore razionale preferirà le tecnologie efficienti". Trovo strano che le persone nutrano una tale fiducia nei mercati, dato che questi ci regalano periodicamente la vista di cose come grandi successi e fallimenti, mancanza di liquidità del credito e fallimenti di banche. Rivolgersi al mercato può essere una buona idea per prendere decisioni di breve termine – ad esempio su investimenti che verranno ripagati in un arco temporale di dieci anni o giù di lì – ma possiamo aspettarci che i mercati prendano le giuste decisioni sull'energia, quando queste hanno impatti che si protraggono per molti decenni o secoli?

Se venisse permesso al libero mercato di costruire delle case, ci troveremmo con case con un isolamento scadente. Le case moderne sono energeticamente più efficienti solo grazie alla legislazione.

Il libero mercato non è responsabile della costruzione di strade, ferrovie, corsie preferenziali per i pullman, parcheggi per automobili o piste ciclabili. Ma la costruzione delle strade e la disponibilità di parcheggi e piste ciclabili ha un impatto significativo sulla scelta dei trasporti delle persone. In modo simile, le leggi di gestione del territorio, che determinano, da un lato, *dove* le case e i luoghi di lavoro possono essere costruiti e, dall'altro, *con quale densità* le case possono coprire i terreni, hanno un'influenza enorme sul modo di viaggiare delle persone nel futuro. Se viene costruita una nuova città senza stazione ferroviaria, è poco probabile che i suoi abitanti facciano lunghi viaggi in treno.

Se le case e i posti di lavoro distassero più di un paio di chilometri tra loro, molte persone sentirebbero di non avere altra scelta che quella di andare al lavoro in auto.

Uno dei più grandi pozzi di energia è la produzione di roba varia; in un mercato libero, molti produttori ci vendono oggetti che hanno un'obsolescenza programmata, cioè [ad un certo punto] devono essere buttati via e sostituiti, in modo da garantire sempre maggiori vendite nel tempo.

Quindi, mentre i mercati possono giocare un ruolo, è sciocco dire "lasciamo che il mercato gestisca *tutto* da solo ". Dobbiamo affrontare, anche, il ruolo giocato dale leggi, i regolamenti e le tasse.

Rinverdire il nostro sistema fiscale

> *C'è bisogno di rivedere profondamente il nostro sistema fiscale. Lo scopo è quello di tassare di più l'inquinamento – in particolare quello dei combustibili fossili – e tassare meno il lavoro.*
>
> Nicolas Sarkozy, Presidente della Repubblica Francese

Oggigiorno costa molto meno comprare un nuovo forno a microonde, un nuovo lettore DVD o un nuovo aspirapolvere rispetto a farli aggiustare quando non funzionano. Questo è pura follia.

Questa pazzia è causata in parte dal nostro sistema fiscale, che tassa il lavoro del riparatore di forni a microonde e lo obbliga a sprecare molto del suo tempo nella compilazione di scartoffie burocratiche. Lui sta facendo una cosa *buona*, ovvero la riparazione del mio forno a microonde! – eppure il sistema fiscale gli rende la vita difficile.

L'idea di "rinverdire il sistema di tassazione" è di spostare le tasse dalle cose "buone" come ad esempio il lavoro, alle cose "cattive" come, ad esempio, il danno all'ambiente. I promotori di una riforma fiscale amica dell'ambiente suggeriscono di bilanciare i tagli delle tasse sulle cose "buone" con equivalenti incrementi sulle cose "cattive", in modo che dal punto di vista delle entrate totali le due decisioni si bilancino.

Carbon tax

La tassa più importante da aumentare, se vogliamo promuovere le tecnologie senza combustibili fossili, è quella sul carbonio. Il prezzo del carbonio deve essere abbastanza alto da promuovere gli investimenti in soluzioni alternative ai combustibili fossili e in misure per l'efficienza energetica. Notate che questa è esattamente la stessa politica suggerita nel paragrafo precedente. Quindi, sia che la nostra motivazione sia quella di fermare il cambiamento climatico, o quella di assicurare la sicurezza energetica, il risultato è lo stesso: c'è bisogno di un prezzo sul carbonio che sia alto e stabile. La Figura 29.2 confronta (molto grossolanamente), da un lato, i vari prezzi del carbonio che sono necessari per rendere attrattivi economicamente gli investimenti e i cambiamenti di comportamento, e, dall'altro, quelli molto più bassi chiesti da alcune organizzazioni che pretendono di "compensare" le emissioni di gas serra. Qual è il modo migliore per ottenere un prezzo elevato per il carbonio? È forse la borsa europea di scambio delle emissioni la via giusta (figura 29.1)? La palla passa nel campo degli economisti e degli esperti di politiche internazionali. Il punto di vista degli economisti di Cambridge, Michael Grubb e David Newbery, è che la borsa

europea di scambio delle emissioni non risponda alla bisogna – "gli strumenti attuali non creeranno le condizioni per un risposta adeguata degli investitori".

La rivista *The Economist* suggerisce una tassa sul carbonio come primo meccanismo di supporto pubblico alle fonti energetiche pulite. Il The Conservative Party's Quality of Life Policy Group [il gruppo del partito conservatore inglese sulle politiche per la qualità di vita. (N.d.T.)] raccomanda anche di aumentare le tasse per la difesa dell'ambiente riducendo le altre – "uno spostamento [di approccio] da *paga per quello che guadagni* a *paga per quello che bruci*". La Royal Commission on Environmental Pollution [commissione reale per l'inquinamento ambientale, (N.d.T.)] dice anch'essa che il Regno Unito dovrebbe introdurre una tassa sul carbonio. "Dovrebbe applicarsi a monte e coprire tutti i settori".

Quindi c'è un chiaro supporto per una grande tassa sul carbonio, accompagnata da riduzioni delle tasse sull'impiego e delle imposte sulle società e sul valore aggiunto. Ma le tasse e i mercati, da soli, non sono in grado di compiere tutte le azioni necessarie. L'approccio di agire su tasse e mercati fallisce quando il consumatore sceglie in maniera non razionale, o quando per lui vale di più il contante risparmiato oggi piuttosto che quello di domani, oppure ancora, quando le persone nel momento in cui scelgono cosa comprare non pagano tutti i costi associati alla loro scelta.

Infatti, molti marchi sono "*costosi in modo rassicurante*". La scelta del consumatore non è determinata solamente dal prezzo. Per molti consumatori conta molto di più l'immagine e la percezione, e alcuni acquistano deliberatamente ciò che è costoso.

Una volta che è stato acquistato un oggetto inefficiente, è troppo tardi. È essenziale, in primo luogo, non produrlo proprio; o che il consumatore, quando compra, sia spinto a non comprare ciò che è inefficiente.

Nei paragrafi che seguono vengono riportati ulteriori esempi di fallimenti del libero mercato.

Le barriere all'ingresso

Immaginate che le tasse sul carbonio siano così alte che un nuovo incredibile gizmo [sinonimo di gadget. (N.d.T.)] a bassa emissione di carbonio possa arrivare a costare il 5% in meno del Dino-gizmo, il suo diretto concorrrente sul mercato da molto più tempo e ad alta emissione di carbonio, *quando* sono prodotti su larga scala e nelle stesse quantità. Grazie a una tecnologia intelligente, le emissioni associate all'Eco-gizmo sono fantasticamente inferiori del 90% rispetto al Dino-gizmo. É chiaro che sarebbe un bene per la società se tutti comprassero ora gli Eco-gizmo. Purtroppo, le vendite del nuovo Eco-gizmo sono basse e quindi i costi di produzione unitari sono maggiori di quelli del Dino-gizmo. Solamente qualche "fricchettone" o scienziato comprerà l'Eco-gizmo, e la Eco-gizmo srl. fallirà.

Per facilitare la scelta e dare una possibilità all'innovazione, sono forse necessari interventi del governo. Sostegni alla ricerca e sviluppo? Incentivi fiscali per favorire i nuovi prodotti (come gli incentivi che hanno facilitato il passaggio dalla benzina con il piombo a quella senza)?

Il problema delle piccole differenze di costo

Immaginate che la Eco-gizmo srl. ce la faccia a crescere e che le tasse sul carbonio siano sufficientemente alte che un Eco-gizmo prodotto dalla Eco-gizmo srl. costi davvero il 5% in meno di quello rivale di vecchia data ad alta emissione di carbonio della Dino-appliances srl. Siamo sicuri che le tasse sul carbonio faranno adesso il loro lavoro e tutti i consumatori compreranno il gizmo a bassa emissione di carbonio? Mmm. Primo: molti consumatori non si curano affatto di una differenza del 5% nel prezzo. L'immagine è tutto. Secondo: se la Dino-appliances srl. si sentisse minacciata dall'Eco-gizmo srl. rilancerebbe il suo Dino-gizmo, enfatizzando quanto sia più patriottico, annunciando una versione disponibile di colore verde e facendo vedere persone famose che maneggiano il vecchio e fedele Dino-gizmo. "I veri uomini comprano Dino-gizmo". Se questo non funzionasse, Dino pubblicherebbe dei comunicati stampa dicendo che gli scienziati non hanno escluso la possibilità che un uso prolungato dell'Eco-gizmo possa causare cancro, evidenziando il caso di un'anziana donna che è stata spaventata da un Eco-gizmo, oppure suggerendo che gli Eco-gizmo feriscono i pipistrelli della frutta dalle ali maculate. Paura, incertezza, dubbio. In ogni caso, se necessario, la Dino-appliances potrebbe sempre comprarsi la Eco-gizmo. Il prodotto vincitore non avrebbe nulla a che vedere con il risparmio energetico se l'incentivo economico per il consumatore è solo del 5%.

Come risolvere questo problema? Forse il governo dovrebbe semplicemente vietare le vendite del Dino-gizmo (proprio come ha vietato le vendite delle auto a benzina con il piombo)?

Il problema di Larry e Tina

Immaginate che Larry, proprietario di un appartamento ammobiliato, lo affitti a Tina l'inquilina. Larry ha la responsabilità della manutenzione e degli elettrodomestici, mentre Tina paga ogni mese le bollette per il riscaldamento e l'elettricità. In questa situazione risiede il problema: Larry non si sente incentivato ad investire in modifiche nell'appartamento che ridurrebbero le bollette di Tina. Potrebbe montare lampadine più efficienti e installare un frigorifero meno energivoro; questi elettrodomestici amici dell'ambiente ripagherebbero facilmente il loro maggiore costo iniziale nel corso della loro lunga vita; ma sarebbe Tina a beneficiarne, non Larry. Ugualmente, Larry si sentirebbe poco incentivato a migliorare l'isolamento termico o ad installare finestre con doppi vetri, specialmente se ci

fosse il rischio che Wayne, il fidanzato di Tina possa romperne una quando ubriaco. In principio, in un mercato perfetto, Larry e Tina prenderebbero entrambi le decisioni "giuste": Larry installerebbe tutto il necessario per risparmiare energia e proporrebbe a Tina un'affitto mensile leggermente più alto; Tina concorderebbe sul fatto che vivere nell'appartamento moderno e sistemato a dovere sarebbe più economico e, quindi, sarebbe felice di pagare un'affitto più alto; Larry chiederebbe, a questo punto, una cauzione più alta per coprire i possibili maggiori danni alle nuove costose finestre; e Tina risponderebbe razionalmente mettendo alla porta Wayne. In ogni caso, non penso che Larry e Tina possano mai essere espressione di un mercato perfetto. Tina è povera, quindi ha difficoltà a mettere come cauzione grandi somme. Larry spera vivamente di affittare l'appartamento, quindi Tina diffiderebbe della affermazioni di Larry a proposito delle basse bollette energetiche, sospettando che Larry stia esagerando.

É richiesto un qualche tipo di intervento, per far fare a Larry e Tina la cosa giusta – per esempio, il governo potrebbe imporre per legge un'enorme tassa sugli elettrodomestici inefficienti; bandire dalla vendita tutti i frigoriferi che non soddisfano certi limiti di consumo; richiedere che tutti gli appartamenti soddisfino alti standard di isolamento; o introdurre un sistema obbligatorio e indipendente di valutazione del consumo energetico dell'appartamento, cosicché Tina possa conoscere il profilo energetico dell'appartamento prima di affittarlo.

Investimenti in ricerca e sviluppo

Deploriamo le piccole cifre che il governo ha assegnato per le attività di ricerca e sviluppo legate alle energie rinnovabili (12.2 milioni di £ nel 2002-03). ... Se, nel Regno Unito, altre risorse oltre all'eolico devono essere sfruttate, tutto ciò deve cambiare. Non possiamo che arrivare alla conclusione che il governo non sta affrontando i problemi energetici con la dovuta serietà.

Comitato per la Scienza e la Tecnologia della Camera dei Lord

L'assenza di comprensione della Scienza a volte conduce a prendere decisioni in modo superficiale. Il libro bianco dell'energia del 2003 ne è un buon esempio. Non mi piace dire pubblicamente che si tratta di un lavoro da dilettanti, ma esso non affronta il problema in modo realistico.

Sir David King, ex capo consigliere scientifico del governo britannico

Partecipando al tavolo consultivo sulle energie rinnovabili creato dal governo ... ho avuto l'impressione di stare guardando, al rallentatore, gli episodi della serie televisiva Yes Minister *[serie televisiva satirica*

britannica. (N.d.T.)]. Non credo che questo governo abbia mai preso sul serio le energie rinnovabili.

Jeremy Leggett, fondatore di Solarcentury

Credo che i numeri parlino da soli. Guardate solamente la figura 28.5 (p. 242) e confrontate i miliardi spesi per le ristrutturazioni degli uffici con gli stanziamenti centinaia di volte inferiori per la ricerca e sviluppo legata alle energie rinnovabili. C'è bisogno di decenni per sviluppare tecnologie rinnovabili come quelle che sfruttano i flussi delle maree, il solare a concentrazione e il fotovoltaico. Anche la fusione nucleare richiede decen-

Tabella 29.3. Otto semplici azioni personali.

Azione semplice	risparmio possibile
Mettetevi un maglione di lana e abbassate il termostato del riscaldamento (indicativamente a 15 °Coppure 17 °C). Installate un termostato su ogni radiatore. Fate in modo che il riscaldamento sia spento quando non c'è nessuno in casa. Fate lo stesso al lavoro.	20 kWh/gg
Leggete tutti i vostri contatori (gas, electricità, acqua) ogni settimana, e identificate qualche facile cambiamento per ridurre i consumi (ad esempio, spegnere gli elettrodomestici). Fate dei paragoni, delle gare con i vostri amici. Leggete i contatori anche al lavoro, creando una processo continuo di revisione del consumo energetico.	4 kWh/gg
Smettete di volare.	35 kWh/gg
Guidate meno, guidate più lentamente, guidate più tranquillamente, fate car-pooling, usate un'auto elettrica, unitevi ad un club automobilistico, andate in bici, camminate, prendete il treno e il bus.	20 kWh/gg
Utilizzate più a lungo i vostri gadget (per esempio i computer); non cambiateli sovente.	4 kWh/gg
Cambiate le lampadine sostituendole con lampade fluorescenti o a led.	4 kWh/gg
Non comprate cianfrusaglie. Evitate gli imballaggi.	20 kWh/gg
Mangiate vegetariano, sei giorni su sette.	10 kWh/gg

ni. Lo sviluppo di tutte queste tecnologie richiedono un aiuto costante e grande se vogliamo che abbiano successo.

Azioni personali

A volte la gente mi domanda "Cosa *dovrei* fare?".

La tabella 29.3 indica otto semplici azioni personali che consiglio, e un'indicazione *molto* grossolana dei risparmi associati ad ognuna. Occhio alle condizioni, però. Infatti, i risparmi dipendono dal vostro punto di partenza. Le stime riportate sono riferite ad un consumatore che consuma un po' più della media. Mentre le azioni della tabella 29.3 sono facili da implementare, quelle della tabella 29.4 necessitano di una pianificazione più accurata, di determinazione, e di soldi.

Tabella 29.4. Sette azioni più difficili.

Azione importante	risparmio possibile
Eliminate gli spifferi d'aria.	5 kWh/gg
Doppi vetri.	10 kWh/gg
Migliorate l'isolamento dei muri, vetri, tetti e pavimenti.	10 kWh/gg
Pannelli solari termici per l'acqua calda.	8 kWh/gg
Pannelli fotovoltaici.	5 kWh/gg
Demolite vecchi edifici e rimpiazzateli con edifici nuovi.	35 kWh/gg
Rimpiazzate gli impianti di riscaldamento a combustibile fossile con pompe di calore ad acqua o ad aria.	10 kWh/gg

Infine, la tabella 29.5 riporta i comportamenti che hanno guadagnato il secondo posto perché sono semplici da adottare ma comportano dei risparmi modesti.

Tabella 29.5. Quache azione ancora più semplice con piccoli risparmi.

Azione	risparmio possibile
Lavate le stoviglie in acqua fredda.	0.5 kWh/gg
Smettete di usare l'asciugatrice; utilizzate degli stendibiancheria o un armadio riscaldato per asciugare i panni.	0.5 kWh/gg

Note ed approfondimenti

p.

246 *"un po' impraticabile effettivamente* La trascrizione completa dell'intervista a Tony Blair (9 gennaio 2007) è disponibile qui [2ykfgw]. Ecco altri passi dell' intervista
Giornalista: Ha mai pensato di non prendere l'aereo per andare alle Barbados in vacanza e di non percorrere tutti questi chilometri via aria?
Tony Blair: Francamente, sarei riluttante a rinunciare alle mie vacanze all'estero.
Giornalista: Certamente manderebbe un chiaro messaggio, nevvero, se non vedessimo questo lungo viaggio verso un posto al sole? ... – una vacanza più vicina a casa?
Tony Blair: Si – ma personalmente penso che queste cose siano un po' impraticabili da aspettarsi che le persone le facciano. Penso che quello che si debba fare sia capire come i viaggi aerei possano essere energeticamente più efficienti, come sviluppare nuovi combustibili che ci permettano di bruciare meno energia ed emettere di meno. Come – per esempio – le nuove strutture degli aerei, possano garantire una maggiore efficienza.
Lo so che tutti sempre – la gente pensa che probabilmente il primo ministro non dovrebbe proprio andare in vacanza, ma penso che se quello che facciamo in questo campo sia fissare degli obiettivi irrealistici, cioè se dicessimo alla gente che cancelleremo tutti i voli low cost ... Cioè, sto ancora aspettando il primo politico in corsa per vincere le elezioni che lo dica – non lo diranno.

L'altra citazione: "Se non agissimo adesso – non in qualche altro momento, ma adesso – queste conseguenze disastrose saranno irreversibili. Quindi non c'è niente di più serio o urgente che mostrare la via da seguire." è un estratto del discorso di Tony Blair al momento della pubblicazione del rapporto Stern, 30 ottobre 2006 [2nsvx2]. Si veda anche [yxq5xk] per ulteriori commenti.

250 *Riforma fiscale per l'ambiente.* Si veda la Green Fiscal Commission, `www.greenfiscalcommission.org.uk`.

251 The Economist *raccomanda una tassa sul carbonio.* "La nuova era dell'energia nucleare" *The Economist*, 8 settembre 2007.

– *Quality of Life Policy Group del partito conservatore* – Gummer et al. (2007).

30 Piani energetici per Europa, America e Mondo

La Figura 30.1 mostra i consumi energetici di molti Paesi o regioni in rapporto ai loro prodotti interni lordi (PIL). È un assunto diffuso che sviluppo umano e crescita siano cose buone; così, abbozzando i piani mondiali per l'energia sostenibile, assumerò che tutti i Paesi con basso PIL pro capite siano in procinto di progredire verso la parte destra di figura 30.1. Ed all'aumentare del PIL, è inevitabile che i consumi di energia aumentino a loro volta. Non è chiaro quale sia il consumo da mettere in conto, ma ritengo che il livello medio europeo (125 kWh al giorno per persona) sia un'ipotesi ragionevole; in alternativa, si potrebbe supporre che le misure di efficienza, come quelle previste per il modello schematico di Gran Bretagna nei Capitoli 19–28, consentano a tutti i Paesi di raggiungere uno standard di vita europeo con un consumo di energia inferiore. Nella pianificazione a pagina 226, i consumi di tale modello stilizzato sono scesi a circa 68 kWh/gg/p. Tenendo presente che la Gran Bretagna "in versione fumetto" non ha molta attività industriale, forse sarebbe sensato presumere un target leggermente più alto, tipo Hong Kong, a 80 kWh/gg/p.

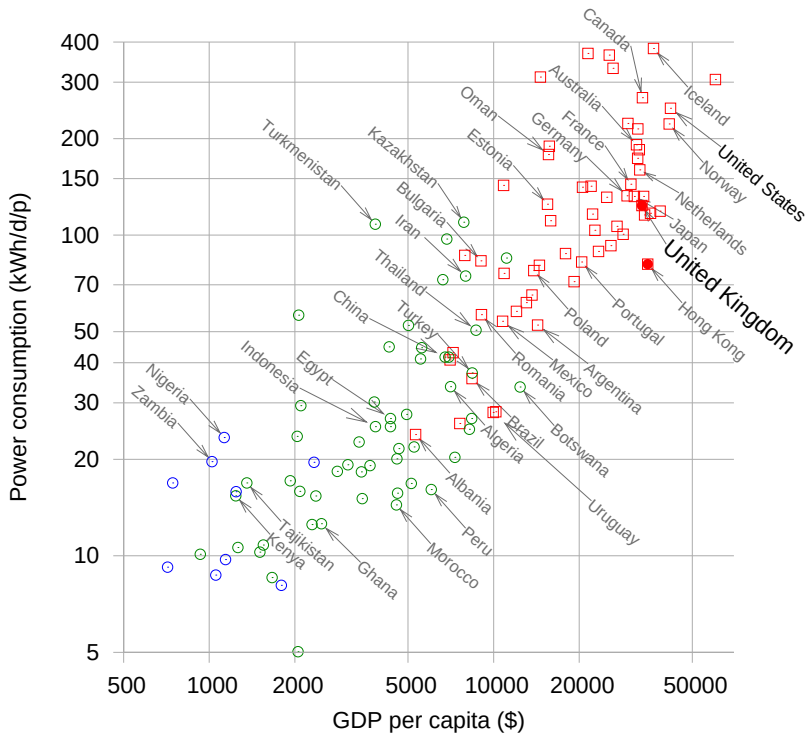


Figura 30.1. Consumi energetici per abitante versus PIL pro capite, a parità di potere d'acquisto in dollari USA. I dati provengono dal UNDP Human Development Report del 2007. I quadrati rappresentano i Paesi ad "alto sviluppo umano", i cerchi quelli a "medio sviluppo" o "basso". Entrambe le variabili sono in scala logaritmica. La Figura 18.4 mostra gli stessi dati in scala normale.

Rifacciamo i calcoli per l'Europa

L'Europa può vivere grazie alle rinnovabili?

La densità media della popolazione europea è circa la metà di quella della Gran Bretagna, quindi c'è più spazio in cui mettere enormi impianti rinnovabili. La superficie dell'Unione Europea è di circa 9000 m^2 per abitante. Tuttavia, molte delle energie rinnovabili hanno in Europa una densità di potenza inferiore a quella in Gran Bretagna: la maggior parte dell'Europa ha meno vento, meno onde e meno maree. Alcune regioni hanno più potenziale idroelettrico (Scandinavia ed Europa Centrale), altre più solare. Tiriamo fuori qualche numero grezzo.

Eolico

La velocità del vento nel cuore dell'Europa continentale ha valori tipici inferiori a quelli delle isole britanniche – per fare un esempio, in gran parte d'Italia è inferiore a 4 m/s. Ipotizziamo che un quinto dell'Europa abbia abbastanza velocità del vento per parchi eolici con una densità di potenza di 2 W/m^2 e diamo, quindi, per scontato che per quelle regioni valga lo stesso trattamento dato alla Gran Bretagna nel Capitolo 4, ossia un riempimento del 10% con impianti eolici. La superficie dell'Unione Europea è di circa 9000 m^2 per abitante. Pertanto il vento ci dà

$$\frac{1}{5} \times 10\% \times 9000\,\mathrm{m}^2 \times 2\,\mathrm{W/m}^2 = 360\,\mathrm{W}$$

da cui 9 kWh/gg a persona.

Idroelettricità

La produzione idroelettrica in Europa è pari a 590 TWh/anno, ossia 67 GW, condivisi tra 500 milioni di abitanti, significano 3.2 kWh/gg a persona. Tale produzione è dominata da Norvegia, Francia, Svezia, Italia, Austria e Svizzera. Se ogni Paese raddoppiasse i propri impianti idroelettrici – cosa che reputo difficile – allora l'acqua ci darebbe 6.4 kWh/gg a persona.

Moto ondoso

Prendendo l'intera costa atlantica (circa 4000 km) e moltiplicandola per una produzione media ipotizzata di 10 kW/m, si ottengono 2 kWh/gg a persona. Le coste del Baltico e del Mediterraneo non hanno risorse in termini di moto ondoso di cui valga la pena parlare.

Maree

Raddoppiando la risorsa totale stimata intorno alle isole britanniche (11 kWh/gg a persona, dal Capitolo 14), per tener conto delle maree francesi, irlandesi

e norvegesi, suddividendo, quindi, il tutto tra una popolazione di 500 milioni di abitanti, si ottengono 2.6 kWh/gg a persona. Le coste del Baltico e del Mediterraneo non hanno maree di cui valga la pena parlare.

Figura 30.2. Uno scalda-acqua solare che fornisce acqua calda ad una famiglia del Michigan. La pompa del sistema è alimentata dal piccolo pannello fotovoltaico a sinistra.

Solare fotovoltaico e pannelli termici sui tetti

La maggior parte delle località dell'Europa continentale è più soleggiata del Regno Unito, di modo che i pannelli solari potrebbero fornire qui più potenza. 10 m^2 di pannelli fotovoltaici montati sul tetto potrebbero consegnare circa 7 kWh/gg in qualsiasi posto a sud del Regno Unito. Analogamente, 2 m^2 di pannelli per l'acqua calda potrebbero fornire in media 3.6 kWh/gg sotto forma di calore, ossia energia a basso grado. (Non vedo molto senso nel suggerire più di 2 m^2 di pannelli termici a persona, dal momento che tale capacità sarebbe di per sé sufficiente per saturare la domanda tipica di acqua calda).

Che altro ancora?

Sin qui il totale è $9 + 6.4 + 2 + 2.6 + 7 + 3.6 = 30.6$ kWh/gg a persona. Le uniche risorse non menzionate finora sono il geotermico ed i parchi solari su larga scala (con specchi, pannelli o biomasse).

Il geotermico potrebbe funzionare, ma è ancora allo stadio della ricerca. Suggerisco di trattarlo come la fusione nucleare: un buon investimento, sul quale non fare affidamento per ora.

E per quanto riguarda i parchi solari? Potremmo immaginare di usare il 5% dell'Europa (450 m^2 a persona) per parchi fotovoltaici come quello bavarese in figura 6.7 (che ha una densità di potenza di 5 W/m^2). Questo ci fornirebbe una potenza media di

$$5\,W/m^2 \times 450\,m^2 = 54\,\text{kWh/gg a persona}.$$

I parchi fotovoltaici andrebbero ad aggiungere, quindi, qualcosa di sostanzioso. Il problema principale con i pannelli fotovoltaici è il loro costo. Un'altra fonte di preoccupazione è come ottenere energia durante l'inverno!

Le colture energetiche? Le piante catturano solo 0.5 W/m^2 (figura 6.11). Dato che l'Europa ha bisogno di nutrirsi, il contributo energetico delle piante in Europa, tolto quello alimentare, non potrà mai essere enorme. Certo, avremo un po' di colza qui e un po' di silvicoltura là, ma non ritengo che il contributo complessivo, non alimentare, delle piante possa essere maggiore di 12 kWh/gg a persona.

Tiriamo le somme

Siamo realistici. Proprio come per la Gran Bretagna, *L'Europa non può vivere esclusivamente grazie alle proprie rinnovabili*. Quindi, se lo scopo è quello di

"uscire" dai combustibili fossili, l'Europa ha bisogno dell'energia nucleare o dell'energia solare nei deserti altrui (come discusso a p. 198), oppure di entrambe.

Rifacciamo i calcoli per il Nord America

L'Americano medio consuma 250 kWh al giorno. Possiamo colpire quel bersaglio con le energie rinnovabili? E se immaginassimo di imporre misure di efficienza scioccanti (come automobili efficienti e treni elettrici ad alta velocità) tale da ridurre gli americani nella misera condizione di vivere con soli 125 kWh/gg, come un cittadino qualsiasi europeo o giapponese?

Eolico

Uno studio condotto da Elliott et al. (1991) ha valutato il potenziale dell'energia eolica degli Stati Uniti. I luoghi più ventosi sono in North Dakota, Wyoming e Montana. Hanno calcolato che, su tutto il Paese, 435 000 km^2 di territorio ventoso potrebbero essere sfruttati senza sollevare troppe ire e che l'elettricità generata sarebbe pari a 4600 TWh all'anno, che diventano 42 kWh al giorno per persona, se ripartiti tra 300 milioni di abitanti. Tra l'altro, nei loro calcoli hanno assunto una densità media di potenza di 1.2 W/m^2– inferiore ai 2 W/m^2 del Capitolo 4. La superficie occupata da questi impianti eolici, 435 000 km^2, è all'incirca la stessa della California. La quantità di strutture ed apparecchiature richieste (ipotizzando un fattore di carico del 20%) costituirebbe una capacità eolica di circa 2600 GW, ovverosia un aumento di 200 volte dell'eolico installato negli USA.

Eolico sul mare

Supponendo di avere a disposizione acque poco profonde al largo per una superficie pari alla somma del Delaware e del Connecticut (20 000 km^2, una fetta sostanziale di tutte le acque poco profonde della costa orientale degli Stati Uniti), riempite di parchi eolici offshore con una densità di potenza di 3 W/m^2, si ottiene una potenza media di 60 GW. Questi sono 4.8 kWh/gg a persona, se ripartiti tra 300 milioni di abitanti. Gli apparecchi aereogeneratori richiesti ammonterebbero a 15 volte tutto l'eolico attualmente installato negli USA.

Geotermico

Nel Capitolo 16 ho citato lo studio sull'energia geotermica del MIT (Massachusetts Institute of Technology, 2006). Gli autori sono ottimisti circa il potenziale del geotermico in Nord America, soprattutto negli stati occidentali, dove c'è roccia più calda. "Con un investimento ragionevole in R&S [ricerca e sviluppo. (N.d.T.)], i sistemi geotermici avanzati sarebbero

in grado di fornire nei prossimi 50 anni 100 GW(e) di capacità di generazione, se non di più, a costi competitivi. Inoltre, i sistemi geotermici avanzati forniscono una fonte di energia sicura a lungo termine". Supponiamo che abbiano ragione. 100 GW di energia elettrica diventano 8 kWh/gg a persona, quando sono condivisi da 300 milioni di abitanti.

Idroelettrico

Gli impianti idroelettrici di Canada, USA e Messico generano circa 660 TWh all'anno. Dividendo tra 500 milioni di abitanti si ha un importo di 3.6 kWh/gg a persona. La produzione idroelettrica del Nord America potrebbe essere raddoppiata? Se così fosse, l'idroelettrico fornirebbe 7.2 kWh/gg a persona.

Che altro ancora?

Sin qui il totale è $42 + 4.8 + 8 + 7.2 = 62$ kWh/gg a persona. Non basta neanche per vivere all'europea! Potremmo discutere varie altre opzioni, come la combustione sostenibile delle foreste canadesi in centrali elettriche. Ma piuttosto che prolungare l'agonia, andiamo subito al sodo con una tecnologia il cui contributo sia sostanziale: il solare a concentrazione.

La Figura 30.3 mostra l'area del Nord America che rifornirebbe ciascuno sul posto (500 milioni di persone) di una potenza media pari a 250 kWh/gg.

Tiriamo le somme

Tolto il solare, le rinnovabili del Nord America non bastano affinché là si viva solo di quelle. Ma se si include una massiccia espansione del solare, ce n'è abbastanza. Di conseguenza, il Nord America ha bisogno del solare nei propri deserti o del nucleare, oppure di entrambi.

Rifacciamo i calcoli per il mondo

Come possono 6 miliardi di persone ottenere la potenza necessaria ad uno standard di vita europeo – vale a dire 80 kWh al giorno per persona?

Eolico

Nel mondo, luoghi eccezionali per i venti forti e costanti sono gli stati centrali degli USA (Kansas, Oklahoma), il Saskatchewan in Canada, le estremità meridionali dell'Argentina e del Cile, il nord-est dell'Australia, il nord-est e nord-ovest della Cina, il nord-ovest del Sudan, il sud-ovest del Sud Africa, la Somalia, l'Iran e l'Afghanistan. Ed ovunque in mare al

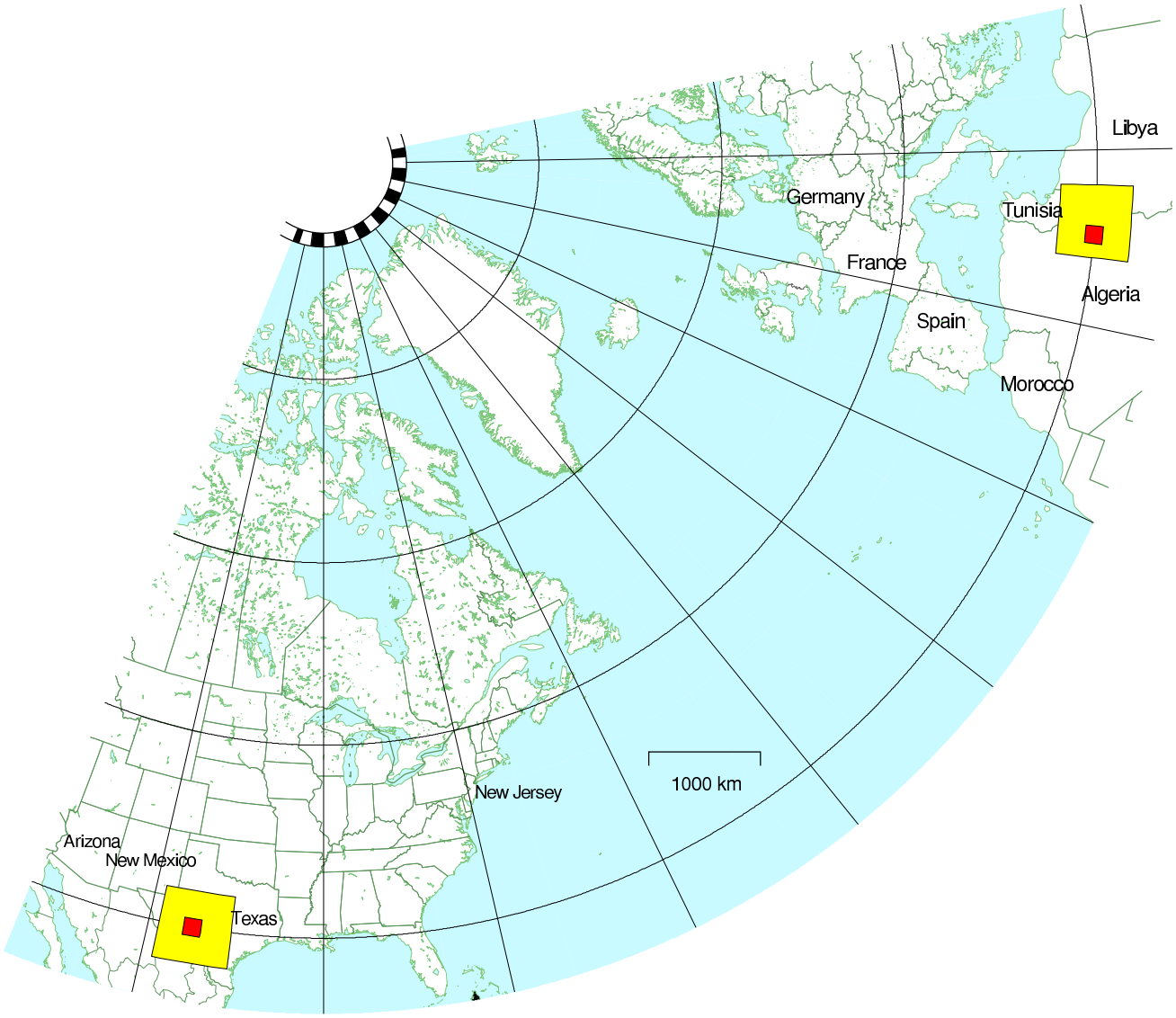


Figura 30.3. La "piazzetta" colpisce ancora. Il quadrato di 600 km di lato, in America del Nord, completamente riempito di impianti per il solare a concentrazione, fornirebbe energia sufficiente per garantire a 500 milioni di persone i consumi di un americano medio, ossia 250 kWh/gg.

La mappa mostra anche il quadrato in Africa, 600 km per 600 km, incontrato in precedenza. Ho considerato una densità di potenza pari a 15 W/m^2, come l'altra volta.

La superficie di uno di questi quadrati gialli supera di poco quella dell'Arizona ed è pari a 16 volte quella del New Jersey. All'interno di entrambe le grandi piazze ce n'è una piccola, 145 km per 145 km, che mostra l'area richiesta nel deserto – un New Jersey – per rifornire 30 milioni di persone con 250 kWh al giorno a testa.

largo, fatta eccezione per una striscia tropicale di ampiezza pari a 60 gradi di latitudine e centrata sull'equatore.

Per la nostra stima globale prendiamo i numeri da Greenpeace e dall'European Wind Energy Association: "il totale delle risorse eoliche disponibili in tutto il mondo è stimato pari a 53 000 TWh all'anno". Da cui 24 kWh/gg a persona.

Idroelettrico

A livello mondiale, l'idroelettricità contribuisce attualmente con circa 1.4 kWh al giorno per persona.

Dal sito internet `www.ieahydro.org`: "La International Hydropower Association e l'Agenzia Internazionale per l'Energia stimano il potenziale idroelettrico complessivo, tecnicamente realizzabile in tutto il mondo, pari a 14 000 TWh/anno [6.4 kWh/gg a persona a livello globale], di cui circa 8000 TWh/anno [3.6 kWh/gg a persona] sono attualmente considerati economicamente redditizi e sviluppabili. La maggior parte del potenziale di sviluppo è in Africa, Asia e America Latina".

Maree

Ci sono molti posti nel mondo con risorse in termini di marea sulla stessa scala dell'estuario del Severn (figura 14.8). In Argentina ci sono due siti: San José e il Golfo Nuevo; l'Australia ha il Walcott Inlet; Stati Uniti & Canada condividono la Baia di Fundy; il Canada ha Cobequid; l'India ha il Golfo di Khambat; gli Stati Uniti hanno Turnagain Arm e Knik Arm e la Russia il Tugur.

E poi c'è il pezzo da novanta, un posto chiamato Penzhinsk in Russia con una risorsa da 22 GW – dieci volte il Severn!

Kowalik (2004) stima che, a livello mondiale, potrebbero esseri generati 40–80 GW di potenza mareomotrice. Messi in comune tra 6 miliardi di persone, diventano 0.16–0.32 kWh/gg a persona.

Moto ondoso

Possiamo stimare la potenza totale estraibile dalle onde moltiplicando la lunghezza delle coste esposte (grosso modo 300 000 km) per la potenza tipica per unità di lunghezza di costa (10 kW al metro): la potenza grezza si attesta quindi sui 3000 GW.

Supponendo che il 10% di questa potenza grezza venga intercettato da sistemi che sono il 50%-efficienti nel convertirla in energia elettrica, il moto ondoso potrebbe fornire 0.5 kWh/gg a persona.

Geotermico

Secondo D. H. Freeston dell'Istituto di Geotermia di Auckland, il geotermico ammontava a circa 4 GW di media, su base mondiale, nel 1995 – da cui 0.01 kWh/gg a persona.

Assumendo che gli autori del MIT, di cui a p. 261, abbiano ragione e che tutto il mondo sia come l'America, allora il geotermico offre 8 kWh/gg a persona.

Solare da colture energetiche

La gente si entusiasma alla grande per colture energetiche tipo la jatropha che, si dice, non avrebbe bisogno di competere per la terra con il cibo, perché può essere coltivata nelle lande desolate. Ma la gente dovrebbe guardare i numeri prima di eccitarsi. I numeri per la jatropha sono a pagina 318. Anche se l'*intera* Africa fosse completamente ricoperta di piantagioni di jatropha, la potenza prodotta, una volta condivisa tra sei miliardi di persone, sarebbe di 8 kWh/gg a persona (che è solo un terzo degli attuali consumi globali di petrolio). Non potete risolvere i vostri problemi di dipendenza dal petrolio passando alla jatropha!

Facciamo una stima del limite della potenza che le colture energetiche potrebbero fornire per tutto il mondo, utilizzando lo stesso metodo applicato alla Gran Bretagna nel Capitolo 6: si immagini di prendere tutti i terreni agricoli e di dedicarli a colture energetiche. Il 18% delle terre del mondo è attualmente arabile o coltivabile – un'area di 27 mln km^2, che diventano 4500 m^2 a persona, dividendo per 6 miliardi. Assumendo una densità di potenza di 0.5 W/m^2 e perdite del 33% dovute alla trasformazione e ai lavori agricoli, si trova che le colture energetiche, una volta subentrate in tutti i terreni, fornirebbero 36 kWh/gg a persona. Ora, forse questa è una sottostima, dal momento che in figura 6.11 (p. 49) abbiamo visto che la canna da zucchero brasiliana è in grado di fornire una densità di potenza pari a 1.6 W/m^2, tre volte più grande di quanto appena assunto. OK, magari le colture energetiche provenienti dal Brasile hanno un futuro. Ma preferisco passare all'ultima opzione.

Solare termico, fotovoltaico e a concentrazione

Gli scaldacqua sono un gioco da ragazzi. Potranno funzionare praticamente ovunque nel mondo. La Cina è leader mondiale in questa tecnologia. Ci sono in tutto il mondo più di 100 GW di capacità installata per il riscaldamento dell'acqua tramite energia solare e più della metà sono in Cina.

Il solare fotovoltaico è tecnicamente realizzabile per l'Europa, ma l'ho giudicato troppo costoso. Spero di sbagliarmi, ovviamente. Sarebbe bello se il costo dell'energia fotovoltaica scendesse allo stesso modo in cui sono diminuiti i costi dei sistemi informatici negli ultimi quaranta anni.

Sheffield	28%
Edimburgo	30%
Manchester	31%
Cork	32%
Londra	34%
Colonia	35%
Copenhagen	38%
Monaco di Baviera	38%
Parigi	39%
Berlino	42%
Wellington, NZ	43%
Seattle	46%
Toronto	46%
Detroit, MI	54%
Winnipeg	55%
Pechino 2403	55%
Sydney 2446	56%
Pola, Croazia	57%
Nizza, Francia	58%
Boston, MA	58%
Bangkok, Thailandia	60%
Chicago	60%
New York	61%
Lisbona, Portogallo	61%
Kingston, Giamaica	62%
San Antonio	62%
Siviglia, Spagna	66%
Nairobi, Kenya	68%
Johannesburg, SA	71%
Tel Aviv	74%
Los Angeles	77%
Upington, SA	91%
Yuma, AZ	93%
Deserto del Sahara	98%

Tabella 30.4. Un mondo assolato in cifre. [3doaeg]

La mia ipotesi è che in molte regioni, la migliore tecnologia solare per la produzione di energia elettrica sarà quella a concentrazione, che abbiamo discusso a pagina 197 e 262. Su queste pagine abbiamo già stabilito che un miliardo di persone tra Europa e Nord Africa potrebbe essere sostenuto da impianti ad energia solare, delle dimensioni di Paesi, nei deserti vicino al Mediterraneo, e che mezzo miliardo in Nord America potrebbe essere sostenuto da strutture delle dimensioni dell'Arizona, nei deserti degli Stati Uniti e del Messico. Lascio come esercizio per il lettore l'individuare deserti adeguati per aiutare gli altri 4.5 miliardi di abitanti del mondo.

Tiriamo le somme

Tolto il solare, i numeri si sommano come segue. Eolico: 24 kWh/gg/p; idroelettrico: 3.6 kWh/gg/p; maree: 0.3 kWh/gg/p; moto ondoso: 0.5 kWh/gg/p; geotermico: 8 kWh/gg/p – per un totale di 36 kWh/gg/p. Il nostro obiettivo era un consumo post-europeo di 80 kWh/gg a persona. Abbiamo una conclusione chiara: le rinnovabili non-solari possono essere "enormi", ma non lo sono abbastanza. Per completare un piano dove i conti tornino, dobbiamo fare affidamento su di una o più forme di energia solare. Oppure utilizzare l'energia nucleare. O entrambe.

Note ed approfondimenti

p.

260 *Risorse del Nord America in termini di eolico offshore.*
`www.ocean.udel.edu/windpower/ResourceMap/index-wn-dp.html`

261 *Il Nord America ha bisogno del solare nei propri deserti o del nucleare o di entrambi.*
Per leggere il piano di Google del 2008 per "defossilizzare" il 40% degli Stati Uniti si vada all'articolo di Jeffery Greenblatt, intitolato *Clean Energy 2030* [`3lcw9c`]. Le caratteristiche principali di questo piano sono le misure per l'efficienza, l'elettrificazione dei trasporti e la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili. Il loro piano di produzione di energia elettrica comprende

10.6 kWh/gg/p	di eolico,
2.7 kWh/gg/p	di fotovoltaico,
1.9 kWh/gg/p	di solare a concentrazione,
1.7 kWh/gg/p	di biomasse,
e 5.8 kWh/gg/p	di geotermico

entro il 2030. Da cui un totale di 23 kWh/gg/p di nuove rinnovabili. Viene ipotizzato anche un piccolo aumento della potenza elettronucleare da 7.2 kWh/gg/p a 8.3 kWh/gg/p e nessuna variazione in termini di idroelettrico. Continuerebbe l'impiego del gas naturale, con un contributo di 4 kWh/gg/p.

263 *Il potenziale idroelettrico complessivo a livello mondiale...*
Fonte: `www.ieahydro.org/faq.htm`.

– *Le risorse del moto ondoso a livello costiero globale sono stimate ammontare a 3000 GW.*
Si veda Quayle and Changery (1981).

264 *Potenza geotermica nel 1995.* Freeston (1996).

– *Colture energetiche.* Si veda Rogner (2000) per stime simili alla mia.

Ulteriori letture consigliate: la rivista *Nature* ha pubblicato un articolo di 8 pagine che discute di come alimentare il mondo (Schiermeier et al., 2008).

31 Un'ultima cosa di cui si dovrebbe parlare

La cattura dell'anidride carbonica presente nell'aria che ci circonda è l'ultima cosa di cui dovremmo parlare.

Dicendo questo, uso deliberatamente una frase ambigua. Da un lato, i costi energetici per la cattura del carbonio presente nell'aria sono così enormi che sembra perlomeno assurdo parlarne (con il fatto oltretutto che menzionare la possibilità di fermare il cambiamento climatico con questa sorta di geoingegneria potrebbe, oggi, incentivare il non far niente). Ma dall'altro, penso che ne dovremmo parlare e trovare il modo migliore per farlo finanziando la ricerca, perché la cattura del carbonio presente nell'aria potrebbe essere l'ultima linea di difesa, se il cambiamento climatico fosse così grave come dicono gli scienziati, e se l'umanità fallisse nel mettere in pratica quelle opzioni più economiche e sensate che possono essere disponibili già oggi.

Prima di parlare della sua cattura, dovremmo comprendere meglio il ruolo giocato dal carbonio su scala globale .

Capire il ruolo giocato dalla CO_2

Quando, per la prima volta, ho pensato a scrivere questo libro, la mia intenzione era quella di ignorare completamente il tema del cambiamento climatico. In alcuni ambienti, la domanda tipo "Il cambiamento climatico sta avvenendo?" era una questione controversa. Proprio come lo erano "É causato dagli umani?" e "Quanto è importante?". E, dopo una lunga lista di domande controverse, si trovava quella finale "E noi che cosa dovremmo fare?". Pensavo che l'energia sostenibile fosse da sola un argomento avvincente e che fosse meglio evitare le polemiche. Il mio ragionamento era: "Non importa quando i combustibili fossili inizieranno a scarseggiare; non importa se il cambiamento climatico sta avvenendo; *bruciare combustibili fossili non è sostenibile comunque*; immaginiamo, allora, di vivere in modo sostenibile, e cerchiamo di capire quanta energia sostenibile è disponibile".

Tuttavia, il tema del cambiamento climatico è ormai entrato a far parte della coscienza collettiva, e ci pone di fronte a delle domande interessanti a cui possiamo rispondere facendo due conti. Quindi, ho deciso di accennarne nella prefazione e in questo capitolo finale. Non vuole essere una discussione esaustiva, ma solo presentare qualche numero interessante.

Le unità

I costi per l'inquinamento da carbonio sono solitamente valutati in dollari o euro per tonnellata di CO_2, quindi userò la *tonnellata di CO_2* come unità di misura riferita all'inquinamento di carbonio pro-capite, e la *tonnellata di CO_2 all'anno* per misurare i tassi d'inquinamento. (Le emissioni medie

di gas serra in Europa [pro-capite] sono pari a 11 tonnellate all'anno di CO_2; ovvero 30 kg al giorno). Mentre, mi riferirò alle tonnellate di carbonio quando parlerò del carbonio presente nei combustibili fossili, nella vegetazione, nel suolo e nell'acqua. Una tonnellata di CO_2 contiene 12/44 tonnellate di carbonio, un pochino di più di un quarto di tonnellata. Su scala planetaria, parlerò di gigatonnellate di carbonio (Gt C). Una gigatonnellata di carbonio è un miliardo di tonnellate. Le gigatonnellate sono difficili da immaginare, ma volendole riportare su una scala umana, immaginate di bruciare una tonnellata di carbone (che è quello che potreste utilizzare per riscaldare una casa per un anno). Adesso immaginate che ognuno sul pianeta bruci una tonnellata di carbone all'anno: sono 6 Gt C all'anno, poiché la terra è popolata da sei miliardi di persone.

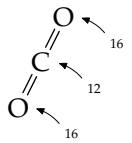


Figura 31.1. I pesi di un atomo di carbonio e di una molecola di CO_2 stanno con un rapporto di 12 a 44, perché l'atomo di carbonio pesa 12 unità e i due atomi di ossigeno ne pesano 16 ciascuno.
$12 + 16 + 16 = 44$.

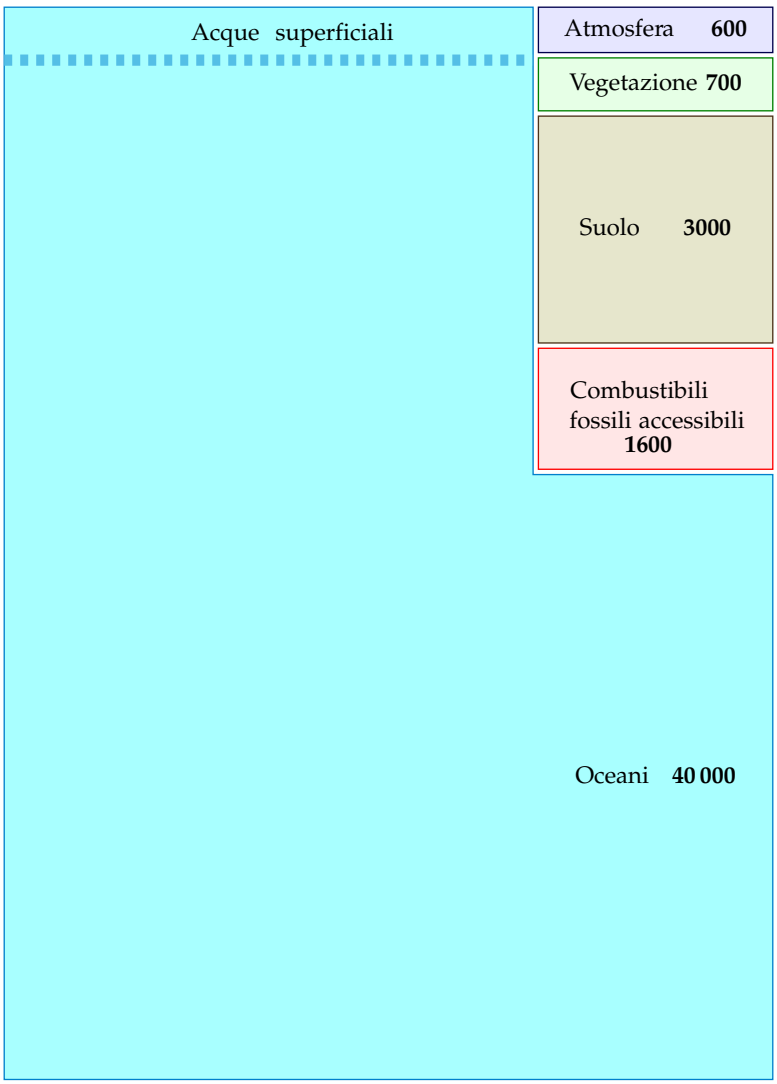


Figura 31.2. Quantità stimate di carbonio, in gigatonnellate, in zone accessibili della terra. (C'è una quantità enorme di carbonio anche nelle rocce; questa percorre un ciclo completo in una scala temporale di milioni di anni, con un equilibrio a lungo termine tra il carbonio sedimentario che subduce ai margini delle placche tettoniche e il carbonio che viene emesso dai vulcani di tanto in tanto. Per semplicità trascuro questa anidride carbonica geologica.)

Dov'è il carbonio?

Dov'è tutto il carbonio? Dobbiamo conoscere quanto ce n'è negli oceani, nel terreno e nella vegetazione, comparandolo con la quantità presente nell'atmosfera, se vogliamo capire le conseguenze delle emissioni di CO_2.

La figura 31.2 mostra dove si trova il carbonio. La maggior parte – 40 000 Gt – si trova nell'oceano (sotto forma di gas di CO_2 disciolto, carbonati, piante viventi e vita animale e materiali in decomposizione). Il suolo e la vegetazione, presi insieme, contengono circa 3700 Gt. I combustibili fossili accessibili – principalmente il carbone – ne contengono circa 1600 Gt. Infine, l'atmosfera ne contiene circa 600 Gt.

Fino a tempi recenti, tutti questi contenitori di carbonio erano grosso modo in equilibrio: tutti i flussi di carbonio in uscita da un contenitore (cioè il suolo, la vegetazione o l'atmosfera) all'altro erano bilanciati da flussi di uguale intensità in entrata, mentre i flussi in ingresso e in uscita dal contenitore dei combustibili fossili erano entrambi trascurabili. Ad un certo punto gli umani iniziarono a bruciare combustibili fossili. Questo fatto aggiunse due flussi in più *non bilanciati*, come mostrato in figura 31.3.

Il tasso di combustione dei combustibili fossili era grosso modo di 1 Gt C/anno nel 1920, 2 Gt C/anno nel 1955, e 8.4 Gt C nel 2006. (Queste cifre includono un piccolo contributo della produzione del cemento, che rilascia la CO_2 dal calcare).

In quale modo questo flusso in più ha modificato la situazione descritta nella figura figura 31.2? In verità non si sa esattamente. La figura 31.3 mostra i dati chiave che *sono* noti. Gran parte del flusso in più che stiamo immettendo nell'atmosfera, del valore di 8.4 Gt C all'anno, rimane lì, aumentando così la concentrazione dell'anidride carbonica. L'atmosfera si pone in equilibrio abbastanza rapidamente con la superficie degli oceani (questo equilibrio impiega solo cinque o dieci anni per essere completato), attraverso un flusso netto di CO_2 dall'atmosfera verso l'interno della superficie delle acque degli oceani che ammonta a 2 Gt C all'anno. (Tuttavia, ricerche recenti indicano che il tasso con cui l'oceano risucchia l'anidride carbonica si starebbe riducendo). Questo flusso non equilibrato verso l'interno della superficie degli oceani causa l'acidificazione degli oceani, il che è una brutta notizia per i coralli. Una porzione extra del carbonio si sposta anche nel suolo e nella vegetazione, forse circa 1.5 Gt C all'anno, ma questi flussi sono misurati con minore accuratezza. Poiché grosso modo la metà delle emissioni di carbonio rimangono in atmosfera, un inquinamento ininterrotto di carbonio ad un tasso di 8.4 Gt C all'anno continuerebbe ad aumentare i livelli di CO_2 nell'atmosfera e nelle acque di superficie.

Qual è la destinazione di lungo termine della CO_2 extra? Beh, dato che l'ammontare nei combustibili fossili è così piccola rispetto al totale contenuto negli oceani, "a lungo andare" il carbonio in più si farà strada negli oceani e le quantità di carbonio nell'atmosfera, nella vegetazione e nel suolo ritornerebbero normali. Comunque, "il lungo termine" signifi-

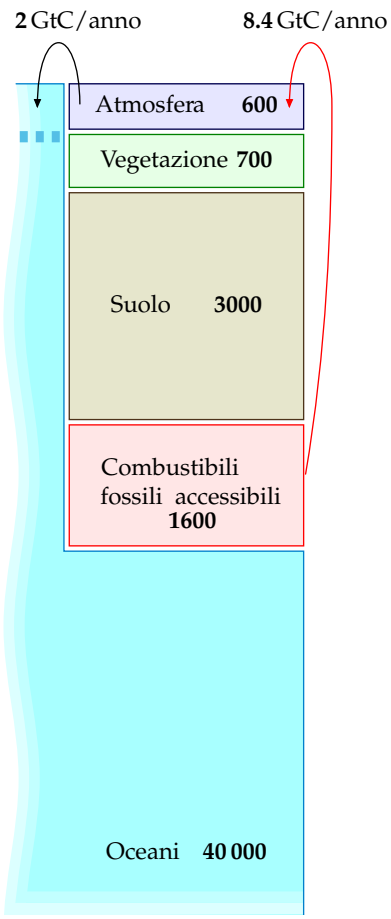


Figura 31.3. Le frecce mostrano due flussi straordinari prodotti dalla combustione dei combustibili fossili. esiste uno sbilanciamento tra gli 8.4 Gt C/anno di emissione in atmosfera della combustione e i 2 Gt C/anno di CO_2 che vengono prelevati dagli oceani. Questo schema omette il flusso (non ben quantificato) tra l'atmosfera, il suolo, la vegetazione e così via.

ca migliaia di anni. L'equilibrio tra l'atmosfera e le acque di *superficie* è rapido, come ho detto, ma le figure 31.2 e 31.3 mostrano una linea tratteggiata che separa le acque di superficie dal resto degli oceani. Su una scala temporale di 50 anni, questo confine è come un muro virtuale. Il carbonio radioattivo disperso per il globo dai test atomici degli anni '60 e '70 è, ad oggi, penetrato negli oceani fino ad una profondità di solo circa 400 m, mentre la profondità media degli oceani è di circa 4000 m.

Le acque degli oceani circolano lentamente: una porzione di acqua oceanica proveniente dalla profondità ci mette circa 1000 anni per arrivare fino alla superficie e tornare giù di nuovo. La circolazione delle acque profonde è attivata da una combinazione di gradienti di temperatura e di salinità, e quindi viene chiamata circolazione termosalina (in contrasto con la circolazione delle acque superficiali, che sono mosse dal vento).

Questo lento rivoltarsi degli oceani ha una conseguenza cruciale: disponiamo di combustibili fossili sufficienti per influenzare seriamente il clima nei prossimi 1000 anni.

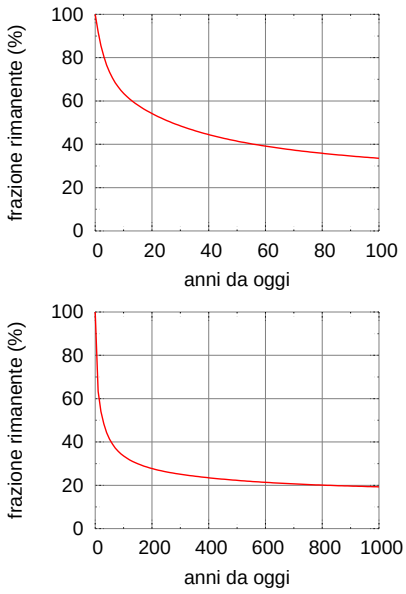


Figura 31.4. Decadimento di una piccola aggiunta puntuale di CO_2 all'atmosfera del giorno d'oggi, secondo il modello di Berna del ciclo del carbonio. Fonte: Hansen et al. (2007).

Dove sta andando il carbonio

La Figura 31.3 è una semplificazione grossolana. Per esempio, gli umani stanno causando flussi addizionali che non sono mostrati nello schema: la combustione della torba e delle foreste nel Borneo nel 1997 ha rilasciato da sola circa 0.7 Gt C. Fuochi accidentali nelle vene di carbone rilasciano circa 0.25 Gt C all'anno.

Ciò nondimeno, questo approccio semplificato ci aiuta a capire a grandi linee cosa accadrà nel breve e medio termine sotto vari scenari. In primo luogo, se l'inquinamento di carbonio continuasse facendo finta che non stia succedendo niente ["business as usual" in inglese, (N.d.T.)] e si bruciassero 500 Gt di carbonio per i prossimi 50 anni, possiamo aspettarci che il carbonio continui a filtrare gradualmente nelle acque superficiali degli oceani ad un tasso di 2 Gt C all'anno. Al 2055, almeno 100 Gt di quelle 500 saranno andate nelle acque superficiali, e i valori di concentrazione di CO_2 nell'atmosfera sarebbero circa il doppio di quelli preindustriali.

Se la combustione di combustibili fossili fosse ridotta a zero intorno agli anni '50 del ventunesimo secolo, il flusso di 2 Gt dall'atmosfera verso gli oceani si ridurrebbe significativamente. (Ho creduto a lungo che questo flusso verso l'oceano sarebbe persistito per decenni, ma questo sarebbe vero solo se le acque di superficie fossero in disequilibrio con l'atmosfera; ma, come ho detto prima, le acque di superficie e l'atmosfera raggiungono un equilibrio nel giro di pochi anni). Gran parte dei 500 Gt che abbiamo immesso nell'atmosfera verrebbero solo trasportati gradualmente negli oceani nelle prossime migliaia di anni, proprio come le acque superficiali si spostano in profondità e sono rimpiazzate da nuova acqua delle profondità.

Così, la nostra perturbazione della concentrazione del carbonio potrebbe essere alla fine corretta, ma solo dopo migliaia di anni. E tutto questo tenendo conto che questa grande perturbazione dell'atmosfera non alteri drasticamente l'ecosistema. Per esempio è concepibile che l'acidificazione delle acque di superficie dell'oceano possa causare un'estinzione della vita marina che innescherebbe un nuovo circolo vizioso: l'acidificazione significherebbe una riduzione della biomassa marina, risultante in un minor assorbimento della CO_2 dall'oceano, e quindi gli oceani diventerebbero ancora più acidi. Questi circoli viziosi (che gli scienziati chiamano "retroazioni positive") sono già successi sulla terra: si crede, per esempio, che le ere glaciali siano finite in maniera relativamente rapida grazie alle retroazioni positive che hanno funzionato più o meno così: l'accrescersi delle temperature ha causato la fusione delle nevi e dei ghiacci di superficie e, quindi, una riduzione della riflessione della radiazione solare, che, a sua volta, ha determinato un maggior assorbimento di calore da parte del terreno da cui è scaturito un innalzamento delle temperature. (La neve fusa – ovvero, l'acqua – riflette meno della neve ghiacciata.) Un altro fenomeno di retroazione positiva di cui ci si dovrebbe preoccupare riguarda gli idrati di metano, che sono congelati in quantità dell'ordine delle gigatonnellate in zone come la Siberia artica, e in quantità dell'ordine delle 100 gigatonnellate sulle piattaforme continentali. Un riscaldamento globale maggiore di 1 °C potrebbe fondere gli idrati di metano, i quali rilascerebbero metano in atmosfera incrementando il riscaldamento globale più di quanto faccia la CO_2.

Questo, però, non è il luogo dove discutere, in modo più dettagliato, le incertezze del cambiamento climatico. Raccomando vivamente la lettura dei libri *Avoiding Dangerous Climate Change* (Schellnhuber et al., 2006) e *Global Climate Change* (Dessler and Parson, 2006) [purtroppo entrambi i libri non sono stati ancora tradotti in italiano, (N.d.T.)], così come gli articoli Hansen et al. (2007) e Charney et al. (1979).

Il proposito di questo capitolo è di discutere l'idea di fermare il cambiamento climatico succhiando l'anidride carbonica dall'aria; discuteremo nel seguito il costo energetico di questo.

Il costo dell'aspirazione dell'anidride carbonica

Al giorno d'oggi, l'estrazione del carbonio dal terreno è un grande affare. Nel futuro, probabilmente, lo sarà il pompaggio *indietro*. Assumendo che adesso vengano compiute azioni inadeguate per fermare l'inquinamento a livello globale da carbonio, forse una coalizione dei volenterosi [dall'inglese coalition of the willing, espressione usata dall'amministrazione Bush per lodare i paesi che appoggiarono o presero parte all'invasione dell'Iraq del 2003. (N.d.T.)], tra qualche decennio, sarà disposta a tirare fuori i soldi per creare un'aspiratore gigante, capace di pulire il disastro compiuto da tutti noi.

Prima di entrare nel dettaglio di come catturare il carbonio dall'aria, discutiamo l'inevitabile costo energetico della cattura del carbonio. Indipendentemente dalla tecnologia utilizzata, si devono rispettare le leggi della fisica, e sfortunatamente acchiappare la CO_2 dall'aria e concentrarla richiede energia. Le leggi della fisica dicono che l'energia richiesta deve essere almeno di 0.2 kWh per kg di CO_2 (tabella 31.5). Dato che questi processi nella realtà sono efficienti al 35% nel migliore dei casi, mi stupirei se il costo energetico della cattura del carbonio possa scendere sotto 0.55 kWh per kg.

Ora, ipotizziamo di voler neutralizzare la produzione europea media di CO_2 di 11 tonnellate all'anno, che sono 30 kg al giorno per persona. L'energia richiesta, assumendo un costo di 0.55 kWh per kg di CO_2, è 16.5 kWh al giorno per persona. Ciò è esattamente lo stesso valore del consumo elettrico britannico. Quindi alimentare l'aspiratore gigante potrebbe richiederci di *raddoppiare* la nostra produzione di elettricità – o almeno, di ottenere in qualche modo una potenza extra di ugual valore alla nostra produzione attuale di energia elettrica.

Se il costo di esercizio degli aspiratori giganti scendesse, ottimo, costruiamoli allora. Ma per quanta ricerca e sviluppo possiamo fare, non potremmo mai aggirare le leggi della fisica, che dicono che acchiappare la CO_2 dall'aria e la successiva concentrazione in CO_2 liquida richiede almeno 0.2 kWh per kg di CO_2.

Ora, qual è il modo migliore per aspirare la CO_2 dall'aria? Discuterò quattro tecnologie diverse per costruire l'aspirapolvere gigante:

A. pompe chimiche;

B. alberi;

C. erosione accelerata delle rocce;

D. concimazione degli oceani.

A. Tecnologie chimiche per la cattura del carbonio

Le tecnologie chimiche tipicamente trattano l'anidride carbonica attraverso due stadi.

$$0.03\%\ CO_2 \xrightarrow{\text{concentrazione}} CO_2 \text{ pura} \xrightarrow{\text{compressione}} CO_2 \text{ liquida}$$

In primo luogo, *concentrano* la CO_2 a partire dalla sua bassa concentrazione in atmosfera; poi la *comprimono* in un piccolo volume pronta per essere spinta in qualche posto (che può essere in un buco nel terreno o anche nel profondo degli oceani). Ognuno di questi passi ha un costo energetico. I costi richiesti dalle leggi della fisica sono mostrati in tabella 31.5.

	costo (kWh/kg)
concentrazione	0.13
compressione	0.07
totale	0.20

Tabella 31.5. Il costo energetico inevitabile della concentrazione e compressione della CO_2 dall'aria.

Nel 2005, i migliori metodi per la cattura della CO_2 dall'aria erano piuttosto inefficienti: il costo energetico era di circa 3.3 kWh al kg, con un

costo finanziario di circa \$140 per tonnellata di CO_2. Con questi dati, la cattura dei 30 kg europei al giorno costerebbe 100 kWh al giorno – quasi la stessa quantità del consumo energetico europeo di 125 kWh al giorno. Questi aspiratori potrebbero essere progettati meglio?

Recentemente, Wallace Broecker, scienziato del clima, "probabilmente il migliore interprete del funzionamento della Terra come un sistema biologico, chimico e fisico", ha promosso una tecnologia per la cattura della CO_2 dall'aria non ancora pubblicata e sviluppata dal fisico Klaus Lackner. Broecker immagina che il mondo possa continuare a bruciare combustibili fossili all'incirca allo stesso ritmo attuale, mentre 60 milioni spazzole (ognuno delle dimensioni di un container standard, messo in piedi) aspirerebbero la CO_2. Che quantitativo di energia richiederebbe il processo di Lackner? Nel giugno 2007 Lackner mi disse che nel suo laboratorio erano arrivati a 1.3 kWh per kg, ma successivamente la sua squadra ha sviluppato un nuovo processo basato su una resina capace di assorbire la CO_2 quando è secca e rilasciarla quando è umida. Lackner mi disse nel giugno 2008 che, in un clima secco, il costo del processo di concentrazione era stato ridotto a circa 0.18–0.37 kWh di calore di bassa qualità per kg di CO_2. Il costo di compressione è di 0.11 kWh per kg. Quindi il costo totale del metodo di Lackner è di 0.48 kWh o meno per kg. Per un'emissione europea di 30 kg CO_2 al giorno, stiamo ancora parlando di un costo di 14 kWh al giorno, dei quali 3.3 kWh al giorno sarebbero di elettricità, ed il resto calore.

Urrà per il progresso della tecnica! Ma per piacere non pensate che si tratti di un *piccolo* costo. Sarebbe necessario, grosso modo, un incremento di circa il 20% del consumo energetico mondiale, solo per far funzionare gli aspirapolveri giganti.

B. E gli alberi?

Gli alberi sono sistemi di cattura del carbonio; aspirano la CO_2 dall'aria e non violano le leggi delle fisica. Infatti, contengono due macchine in una: l'impianto di cattura del carbonio e una centrale solare. Catturano il carbonio utilizzando l'energia ottenuta dalla luce solare. I combustibili fossili che bruciamo furono, in origine, creati da questo processo. Quindi, l'idea potrebbe essere: se provassimo ad utilizzare questo processo al contrario? Ovvero, generare del legno e seppellirlo, mentre contemporaneamente, l'umanità continua a estrarre legno fossile per bruciarlo? È un po' sciocco immaginare, da un latro, di mettere sotto terra del legno mentre, dall'altro, si si continua ad estrarre legno precedentemente seppellito. Ma anche se lo fosse, calcoliamo la superficie di terreno richiesta per risolvere il problema climatico utilizzando gli alberi.

Le piante migliori in Europa catturano il carbonio ad un tasso di circa 10 tonnellate di legno secco per ettaro all'anno – equivalente a circa 15 tonnellate di CO_2 per ettaro all'anno – quindi per compensare l'emissione

1 ettaro = 10 000 m^2

di 11 tonnellate di CO_2 all'anno avremmo bisogno di 7500 metri quadrati di foresta a testa. Questi 7500 metri quadrati a testa è il *doppio dell'area della Gran Bretagna* per persona. E poi si dovrebbe da trovare da qualche parte un magazzino dove conferire questa quantità ogni anno! Con una densità di 500 kg per m^3, il legno associato ad ogni persona occuperebbe 15 m^3 all'anno. Quindi, lo spazio richiesto per questo legno – che, ricordate, deve essere stoccato in modo sicuro e mai bruciato – lungo tutta il corso di una vita dovrebbe essere 1000 m^3. All'incirca cinque volte l'intero volume di una casa normale. Se qualcuno proponesse di usare gli alberi per fermare il cambiamento climatico, dovrebbero rendersi conto che sono necessarie superfici grandi come un stato. Non vedo come possa mai funzionare.

C. Erosione accelerata delle rocce

Esiste un sotterfugio per evitare il costo energetico significativo dell'approccio chimico alla cattura del carbonio? Ecco un'idea interessante: polverizzare le rocce capaci di assorbire la CO_2 e lasciarle all'aria aperta. Questa idea potrebbe essere presentata come l'accelerazione di un processo geologico naturale. Lasciatemi spiegare.

Due flussi di carbonio che ho omesso nella figura 31.3 sono i flussi di carbonio dalle rocce all'interno dell'oceano, associati all'erosione naturale delle stesse, e la precipitazione naturale del carbonio all'interno dei sedimenti marini, che finiscono alla fine per trasformarsi di nuovo in rocce. Questi flussi sono relativamente piccoli, circa 0.2 Gt C per anno (0.7 Gt CO_2 all'anno). Inoltre, essi sono molto piccoli rispetto alle emissioni di anidride carbonica attuali, le quali sono circa quaranta volte maggiori. Ma il suggerimento di coloro che parteggiano per l'erosione accelerata consiste nel fatto che si possa fermare il cambiamento climatico aumentando il tasso a cui le rocce si rompono e assorbono CO_2. Le rocce adatte ad essere frantumate includono le olivine o minerali di silicati di magnesio, che sono molto diffusi. L'idea sarebbe di trovare miniere in luoghi circondati da molti chilometri quadrati di terreno sui quali potrebbero essere sparse le rocce polverizzate, o forse di spargere le rocce direttamente sugli oceani. In entrambi i modi, le rocce assorbirebbero la CO_2 e la convertirebbero in carbonati e i carbonati risultanti finirebbero per essere disciolti negli oceani. La polverizzazione delle rocce in grani sufficientemente piccoli per la reazione con la CO_2 richiede solo 0.04 kWh per kg di CO_2 aspirata. Ma, un momento, questo valore non è inferiore rispetto ai 0.20 kWh per kg richiesti dalle leggi della fisica? Si, ma non c'è nulla di sbagliato: le rocce stesse sono la fonte dell'energia mancante. I silicati possiedono un'energia maggiore che i carbonati, così sono le rocce a pagare il costo energetico dell'aspirazione della CO_2 dall'aria.

Mi piace molto il basso costo energetico di questo metodo, ma la domanda difficile è: chi sarà il primo volontario disposto a ricoprire la sua campagna con delle rocce polverizzate?

D. Concimazione degli oceani

Un problema dei metodi per l'aspirazione della CO_2 dall'aria basati sulla chimica, sulla crescita degli alberi e sulla polverizzazione delle rocce è che tutto ciò richiederebbe molto lavoro e nessuno ha un incentivo per farlo – a meno che un accordo internazionale ne finanzi il costo. Infatti ora come ora i prezzi del carbonio sono troppo bassi.

Un'ultima idea per la cattura del carbonio potrebbe risolvere questa difficoltà. L'idea è quella di persuadere gli oceani a catturare il carbonio un po' più velocemente del normale come un sottoprodotto dell'allevamento ittico.

Alcune zone del mondo soffrono problemi di approvvigionamento di cibo. A causa della pesca eccessiva degli ultimi cinquanta anni, c'è scarsità di pesce in molte zone. L'idea della *concimazione degli oceani* è di concimare gli oceani, aiutando così la base della catena alimentare attraverso la possibilità di ospitare una quantità maggiore di piante e pesci e catturando, contemporaneamente, più anidride carbonica. Guidati dallo scienziato australiano Ian Jones, gli ingegneri della concimazione degli oceani vorrebbero pompare fertilizzanti a base di azoto, come l'urea, in certe zone degli oceani povere di pesce. Essi affermano che una superficie di 900 km^2 di oceano concimato possa assorbire circa 5 Mt CO_2/anno. Jones e i suoi colleghi calcolano che il processo di concimazione degli oceani sia applicabile in ogni area degli oceani in cui ci sia una carenza di azoto. Questo è il caso della maggior parte dell'Atlantico del Nord. Mettiamo questa idea su una cartina. Le emissioni di carbonio del Regno Unito sono di circa 600 Mt CO_2/anno. Quindi la completa neutralizzazione delle emissioni di carbonio della Gran Bretagna richiederebbe 120 di quelle superfici marine.

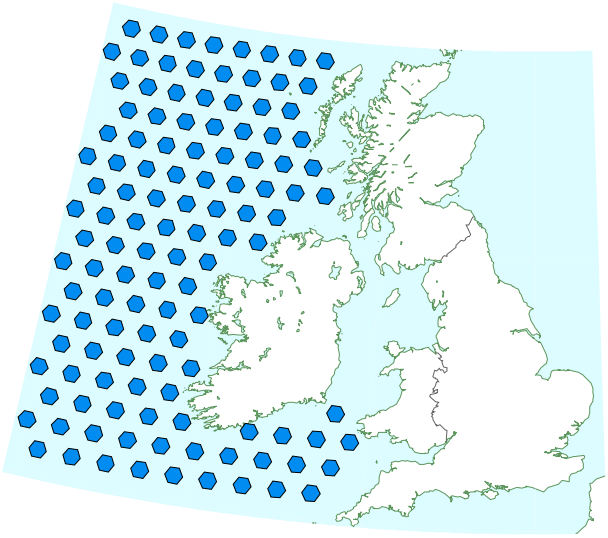
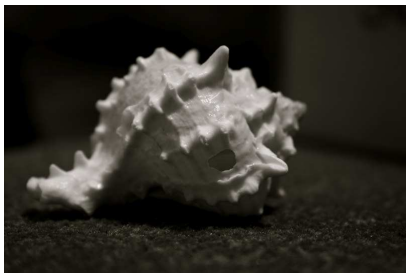


Figura 31.6. 120 aree nell'oceano atlantico, ognuna da 900 km^2. Ciò rappresenta l'area stimata per annullare le emissioni di anidride carbonica della Gran Bretagna mediante la concimazione degli oceani.

La mappa in figura 31.6 mostra queste aree confrontate con la superficie delle isole britanniche. Come al solito, un piano che faccia tornare i conti richiederebbe impianti delle dimensioni di un paese! Senza contare che non abbiamo ancora toccato l'argomento di come tutta l'urea richiesta potrebbe essere prodotta.

Mentre questa è ancora una idea non testata, e oltretutto ancora illegale, penso che la concimazione degli oceani sia interessante, perché, al contrario dello stoccaggio geologico del carbonio, questa è una tecnologia che potrebbe essere implementata anche se la comunità internazionale non si trovasse d'accordo sull'importanza nel procedere alla pulizia del carbonio; in ogni caso i pescatori potrebbero concimare gli oceani solamente per pescare più pesce.

> *Possiamo prevedere che i commentatori si opporranno ad ogni manipolazione dell'oceano, focalizzandosi sulle incertezze piuttosto che sui potenziali benefici. Giocherebbero sulla paura della gente dell'ignoto. La gente è pronta ad accettare passivamente l'escalation di una pratica consolidata (per esempio l'immissione della CO_2 nell'atmosfera) mentre è diffidente davanti alle innovazioni che potrebbero migliorare il benessere futuro. Hanno una avversione al rischio e usano due pesi e due misure.*
>
> Ian Jones



> *Noi, umanità, non possiamo rilasciare in atmosfera tutta o la maggior parte della CO_2 prodotta dai combustibili fossili. Così facendo sarebbe garantito un cambiamento del clima di grandi dimensioni, che ci farà vedere un pianeta molto diverso da quello che conosciamo ora...*
>
> J. Hansen et al (2007)

> *"Evitare un pericoloso cambiamento climatico" è impossibile – un pericoloso cambiamento climatico è già in atto. La domanda è: possiamo evitare un cambiamento climatico* **catastrofico***?*
>
> David King, UK Chief Scientist, 2007

Note ed approfondimenti

p.

267 *il cambiamento climatico ... era una questione controversa*. Infatti c'è ancora "un'enorme differenza di vedute sul cambiamento climatico tra le elite europee e quelle americane". [voxbz].

269 *Dov'è il carbonio?* Fonti: Schellnhuber et al. (2006), Davidson and Janssens (2006).

– *Il tasso di combustione dei combustibili fossili...* Fonte: Marland et al. (2007).

– *Ricerche recenti indicano che l'assorbimento del carbonio dagli oceani potrebbe essere in calo.* www.timesonline.co.uk/tol/news/uk/science/article1805870.ece, www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/1136188, [yofchc], Le Quéré et al. (2007).

– *grosso modo metà delle emissioni di carbonio rimangono in atmosfera*. Ci vogliono 2.1 miliardi di tonnellate di anidride carbonica in atmosfera (7.5 Gt CO_2) per aumentare la concentrazione atmosferica di CO_2 di una parte per milione (1 ppm). Se tutta la CO_2 che abbiamo emesso in atmosfera rimanesse lì, la concentrazione aumenterebbe di più di 3 ppm all'anno – mentre sta aumentando di soli 1.5 ppm all'anno.

270 *Il carbonio radioattivo . . . è penetrato ad una profondità di soli 400 m.* Il valore medio della profondità di penetrazione della bomba ^{14}C per tutti i siti di osservazione durante i tardi anni '70 è di 390±39 m (Broecker et al., 1995). Da [3e28ed].

271 *Un riscaldamento globale maggiore di 1 °C potrebbe fondere gli idrati di metano*. Fonte: Hansen et al. (2007, p1942).

272 *Table 31.5. Il costo inevitabile della concentrazione e della compressione della CO_2 dall'aria.* La necessaria richiesta energetica per concentrare la CO_2 dallo 0.03% al 100% alla pressione atmosferica, è $kT \ln 100/0.03$ per molecola, che equivale a 0.13 kWh per kg. Il costo energetico teorico della compressione della CO_2 a 110 bar (una pressione citata per lo stoccaggio geologico) è 0.067 kWh/kg. Così il costo ideale totale della cattura e compressione della CO_2 è di 0.2 kWh/kg. Secondo la relazione speciale sulla cattura del carbonio e il suo stoccaggio della IPCC, il costo reale della compressione della CO_2 a 110 bar, è di 0.11 kWh per kg. (0.4 GJ per t CO_2; 18 kJ per mole CO_2; 7 kT per molecola.)

– *Spingere la CO_2 in una fossa nel terreno o nel profondo degli oceani.* Si veda Williams (2000) per la discussione su questo argomento. "Per far rimanere grandi frazioni di CO_2 negli oceani, l'iniezione deve essere fatta a considerevoli profondità. Si sta sviluppando l'opinione che la miglior strategia di breve termine sarebbe di scaricare la CO_2 a profondità di 1000–1500 metri, il che potrebbe essere fatto con la tecnologia esistente."
Si veda anche la Relazione Speciale del IPCC: `www.ipcc.ch/ipccreports/srccs.htm`.

273 *Nel 2005, i migliori metodi per la cattura del carbonio erano piuttosto inefficienti: il costo energetico era di circa 3.3 kWh per kg, con un costo finanziario di circa $140 per tonnellata di CO_2.* Fonti: Keith et al. (2005), Lackner et al. (2001), Herzog (2003), Herzog (2001), David and Herzog (2000).

– *Wallace Broecker, scienziato del clima. . .* `www.af-info.or.jp/eng/honor/hot/enrbro.html`. Il suo libro che promuove alberi artificiali: Broecker and Kunzig (2008).

– *Le piante migliori in Europa catturano l'anidride carbonica ad un tasso di circa 10 tonnellate di legno secco per ettaro all'anno.* Fonte: Select Committee on Science and Technology.

274 *Erosione accelerata delle rocce.* Si veda Schuiling and Krijgsman (2006).

275 *Concimazione degli oceani.* Si veda Judd et al. (2008). Si veda anche Chisholm et al. (2001). I rischi della concimazione degli oceani vengono discussi in Jones (2008).

32 *Dire di sì*

Poiché la Gran Bretagna attualmente ricava il 90% della propria energia consumata da combustibili fossili, non sorprende il fatto che l'eliminazione del'uso di questi richieda grandi ma davvero grandi cambiamenti – cambiare completamente il parco mezzi di trasporto, così come la maggior parte degli impianti di riscaldamento degli edifici, e incrementare da 10 a 20 volte la potenza ottenuta da fonti energetiche verdi.

Data la tendenza generale a dire "no" ai parchi eolici, "no" al nucleare, "no" ai bacini per lo sfruttamento dell'energia delle maree – insomma, "no" a qualsiasi cosa che non siano i sistemi di potenza basati su combustibili fossili – sono preoccupato che non riusciremo a eliminare l'uso di questi quando invece sarebbe necessario. Invece ci metteremo sicuramente d'accordo su mezze misure, come: un piccolo incremento dell'efficienza delle centrali a combustibili fossili o delle automobili, oppure degli impianti per il riscaldamento domestico; un mercato dei certificati di credito del carbonio grosso come una foglia di fico; una spolverata di turbine eoliche; un numero inadeguato di centrali nucleari.

Abbiamo bisogno di un piano che faccia tornare i conti e faccia la differenza. La buona notizia è che *è* possibile individuarne uno, ma non sarà un'impresa facile.

Abbiamo bisogno di smettere di dire no e iniziare a dire si. Dobbiamo fermare il teatrino e iniziare a costruire.

Se vi piace avere una politica energetica basata sull'onestà e realtà dei numeri e che faccia realmente la differenza, per piacere ditelo a tutti i vostri rappresentanti politici presenti e futuri.

Ringraziamenti

Per avermi introdotto all'ambientalismo, ringrazio Robert MacKay, Gale Ryba, e Mary Archer.

Per decenni di intense conversazioni su ogni dettaglio, il mio grazie va a Matthew Bramley, Mike Cates e Tim Jervis.

Per le buone idee, l'ispirazione, per l'aver suggerito buoni giri di parole, per le critiche utili e per l'incoraggiamento, ringrazio le seguenti persone, grazie alle quali questo libro ha preso forma. John Hopfield, Sanjoy Mahajan, Iain Murray, Ian Fells, Tony Benn, Chris Bishop, Peter Dayan, Zoubin Ghahramani, Kimber Gross, Peter Hodgson, Jeremy Lefroy, Robert MacKay, William Nuttall, Mike Sheppard, Ed Snelson, Quentin Stafford-Fraser, Prashant Vaze, Mark Warner, Seb Wills, Phil Cowans, Bart Ullstein, Helen de Mattos, Daniel Corbett, Greg McMullen, Alan Blackwell, Richard Hills, Philip Sargent, Denis Mollison, Volker Heine, Olivia Morris, Marcus Frean, Erik Winfree, Caryl Walter, Martin Hellman, Per Sillrén, Trevor Whittaker, Daniel Nocera, Jon Gibbins, Nick Butler, Sally Daultrey, Richard Friend, Guido Bombi, Alessandro Pastore, John Peacock, Carl Rasmussen, Phil C. Stuart, Adrian Wrigley, Jonathan Kimmitt, Henry Jabbour, Ian Bryden, Andrew Green, Montu Saxena, Chris Pickard, Kele Baker, Davin Yap, Martijn van Veen, Sylvia Frean, Janet Lefroy, John Hinch, James Jackson, Stephen Salter, Derek Bendall, Deep Throat, Thomas Hsu, Geoffrey Hinton, Radford Neal, Sam Roweis, John Winn, Simon Cran-McGreehin, Jackie Ford, Lord Wilson of Tillyorn, Dan Kammen, Harry Bhadeshia, Colin Humphreys, Adam Kalinowski, Anahita New, Jonathan Zwart, John Edwards, Danny Harvey, David Howarth, Andrew Read, Jenny Smithers, William Connolley, Ariane Kossack, Sylvie Marchand, Phil Hobbs, David Stern, Ryan Woodard, Noel Thompson, Matthew Turner, Frank Stajano, Stephen Stretton, Terry Barker, Jonathan Köhler, Peter Pope, Aleks Jakulin, Charles Lee, Dave Andrews, Dick Glick, Paul Robertson, Jürg Matter, Alan and Ruth Foster, David Archer, Philip Sterne, Oliver Stegle, Markus Kuhn, Keith Vertanen, Anthony Rood, Pilgrim Beart, Ellen Nisbet, Bob Flint, David Ward, Pietro Perona, Andrew Urquhart, Michael McIntyre, Andrew Blake, Anson Cheung, Daniel Wolpert, Rachel Warren, Peter Tallack, Philipp Hennig, Christian Steinrücken, Tamara Broderick, Demosthenis Pafitis, David Newbery, Annee Blott, Henry Leveson-Gower, John Colbert, Philip Dawid, Mary Waltham, Philip Slater, Christopher Hobbs, Margaret Hobbs, Paul Chambers, Michael Schlup, Fiona Harvey, Jeremy Nicholson, Ian Gardner, Sir John Sulston, Michael Fairbank, Menna Clatworthy, Gabor Csanyi, Stephen Bull, Jonathan Yates, Michael Sutherland, Michael Payne, Simon Learmount, John Riley, Lord John Browne, Cameron Freer, Parker Jones, Andrew Stobart, Peter Ravine, Anna Jones, Peter Brindle, Eoin Pierce, Willy Brown, Graham Treloar, Robin Smale, Dieter Helm, Gordon Taylor, Saul Griffith, David Cebonne, Simon Mercer, Alan Storkey, Giles Hodgson, Amos Storkey, Chris Williams, Tristan Collins, Darran Messem, Simon Singh, Gos Micklem, Peter Guthrie, Shin-Ichi Maeda, Candida Whitmill, Beatrix Schlarb-Ridley, Fabien Petitcolas, Sandy Polak, Dino Seppi, Tadashi Tokieda, Lisa Willis, Paul Weall, Hugh Hunt, Jon Fairbairn, Miloš T. Kojašević, Andrew Howe, Ian Leslie, Andrew Rice, Miles Hember, Hugo Willson, Win Rampen, Nigel Goddard, Richard Dietrich, Gareth Gretton, David Sterratt, Jamie Turner, Alistair Morfey, Rob Jones, Paul McKeigue, Rick Jefferys, Robin S Berlingo, Frank Kelly, Michael Kelly, Scott Kelly, Anne Miller, Malcolm Mackley, Tony Juniper, Peter Milloy, Cathy Kunkel, Tony Dye, Rob Jones, Garry Whatford, Francis Meyer, Wha-Jin Han, Brendan McNamara, Michael Laughton, Dermot McDonnell, John McCone, Andreas Kay, John McIntyre, Denis Bonnelle, Ned Ekins-Daukes, John Daglish, Jawed Karim, Tom Yates, Lucas Kruijswijk, Sheldon Greenwell, Charles Copeland, Georg Heidenreich, Colin Dunn, Steve Foale, Leo Smith, Mark McAndrew, Bengt Gustafsson, Roger Pharo, David Calderwood, Graham Pendlebury, Brian Collins, Paul Hasley, Martin Dowling, Martin Whiteland, Andrew Janca, Keith Henson, Graeme Mitchison, Valerie MacKay, Dewi Williams, Nick Barnes, Niall Mansfield, Graham Smith, Wade Amos, Sven Weier, Richard McMahon, Andrew Wallace, Corinne Meakins, Eoin O'Carroll, Iain McClatchie, Alexander Ac, Mark Suthers, Gustav Grob, Ibrahim Dincer, Ian Jones, Adnan Midilli, Chul Park, David

Gelder, Damon Hart-Davis, George Wallis, Philipp Spöth, James Wimberley, Richard Madeley, Jeremy Leggett, Michael Meacher, Dan Kelley, Tony Ward-Holmes, Charles Barton, James Wimberley, Jay Mucha, Johan Simu, Stuart Lawrence, Nathaniel Taylor, Dickon Pinner, Michael Davey, Michael Riedel, William Stoett, Jon Hilton, Mike Armstrong, Tony Hamilton, Joe Burlington, David Howey, Jim Brough, Mark Lynas, Hezlin Ashraf-Ball, Jim Oswald, John Lightfoot, Carol Atkinson, Nicola Terry, George Stowell, Damian Smith, Peter Campbell, Ian Percival, David Dunand, Nick Cook, Leon di Marco, Dave Fisher, John Cox, Jonathan Lee, Richard Procter, Matt Taylor, Carl Scheffler, Roger Sewell, Shirley Dex, Chris Burgoyne, Francisco Monteiro, Ian McChesney, Alex White e Liz Moyer. Grazie a tutti.

Per avermi aiutato a trovare dati sul clima, ringrazio Emily Shuckburgh. Sono molto grato a Kele Baker per la raccolta dei dati concernenti le auto elettriche esposti in figura 20.21. Ringrazio anche David Sterratt per i contributi nella ricerca, nonché Niall Mansfield, Jonathan Zwart ed Anna Jones per gli ottimi consigli editoriali.

Gli errori rimasti sono ovviamente tutti miei.

Sono particolarmente in debito con Seb Wills, Phil Cowans, Oliver Stegle, Patrick Welche e Carl Scheffler per aver mantenuto operativo il mio computer.

Ringrazio l'African Institute for Mathematical Sciences di Cape Town e l'Isaac Newton Institute for Mathematical Sciences di Cambridge per l'ospitalità.

Molte grazie al Digital Technology Group, Computer Laboratory, Cambridge ed al Dipartimento di Fisica dell'Università di Heriot–Watt per fornire dati metereologici online. Tutta la mia gratitudine alla Jersey Water ed alla Guernsey Electricity per le visite guidate ai loro impianti.

Ringrazio la Gilby Productions per fornire il servizio TinyURL. TinyURL è un marchio della Gilby Productions. Grazie a Eric Johnston ed alla Satellite Signals Limited per fornire una comoda e gradevole interfaccia per le mappe [`www.satsig.net`].

Grazie a David Stern per la foto ritratto, a Becky Smith per la grafica da certosino ed a Claire Jervis per le foto a pagina ix, 36, 100, 105, 170, 273, 323 e 363. Per quanto riguarda le altre foto, grazie a Robert MacKay, Eric LeVin, Marcus Frean, Rosie Ward, Harry Bhadeshia, Catherine Huang, Yaan de Carlan, Pippa Swannell, Corinne Le Quéré, David Faiman, Kele Baker, Tim Jervis, ed a tutti quei collaboratori anonimi che ho trovato su Wikipedia. Sono grato all'ufficio del Sindaco di Londra per l'avermi fornito copie degli annunci pubblicitari.

L'opera d'arte a pagina 267 s'intitola "Maid in London" e quella a pagina 322, "Sunflowers", è di Banksy `www.banksy.co.uk`. Grazie, Banksy!

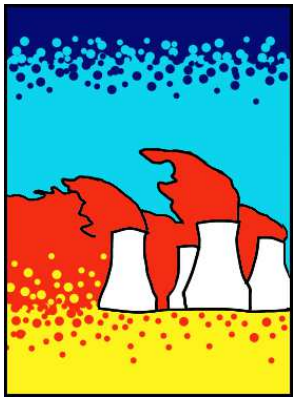
Per la compensazione ci siamo avvalsi dei servizi di `cheatneutral.com`.

Il libro è scritto in LaTeX con sistema operativo GNU/Linux ed usando software gratuito. Le figure sono state disegnate con `gnuplot` e `metapost`. Molte delle mappe sono state create con il software `gmt` di Paul Wessel e Walter Smith. Il mio grazie va anche a MartinWeinelt ed alla OMC. Ringrazio Donald Knuth, Leslie Lamport, Richard Stallman, Linus Torvalds e a tutti coloro il cui contributo mi ha permesso di usare software gratis.

Infine, devo il mio più grande debito di riconoscenza alla Gatsby Charitable Foundation, che ha sostenuto me ed il mio gruppo di ricerca prima, durante e dopo la scrittura di questo libro.

Parte III

Capitoli tecnici



A Automobili II

Si è stimato che un'automobile guidata per 100 km consumi circa 80 kWh di energia.

Le domande che ci si potrebbe porre sono, ad esempio, dove tutta questa energia vada, come questo processo di trasformazione dell'energia dipenda dalla caratteristiche dell'automobile e se si possano costruire auto che siano cento volte più efficienti di quelle attuali. A questo scopo si può fare riferimento ad un semplice modello che descriva dove vada a finire l'energia di un'automobile in movimento. Per un'automobile a carburante fossile si possono individuare quattro principali destinazioni, che saranno esplorate in dettaglio nei prossimi paragrafi e che sono legate a:

1. accelerazioni seguite da frenate;
2. resistenza dell'aria;
3. attrito volvente;
4. calore – il 75% dell'energia è perso sotto forma di calore perchè la catena di conversione è inefficiente.

In un primo momento l'effetto dell'attrito volvente non verrà preso in considerazione. Se ne studieranno gli effetti nel prosieguo del capitolo.

Si supponga che il guidatore acceleri rapidamente fino alla velocità di crociera v e mantenga questa velocità lungo tutta la distanza d che è, ad esempio, la distanza tra due semafori o la fine e l'inizio di una coda. Arrivato al secondo stop, il fatto di schiacciare il pedale del freno convertirà tutta l'energia cinetica in calore rilasciato dai freni. (Questo perchè il veicolo in oggetto non ha installato dei sistemi frenanti rigenerativi.) Una volta ripartito, il guidatore accelererà fino a raggiungere di nuovo la velocità di crociera v. L'accelerazione fornisce all'auto l'energia cinetica necessaria a muoverla. L'uso dei freni converte l'energia cinetica in calore, sprecandola.

L'energia non viene trasformata solo dall'azione dei freni: mentre l'auto si sposta, lascia dietro di sè un turbinio d'aria che si muove ad una velocità prossima a v. Ci si può chiedere, tra l'energia cinetica dell'aria spostata e il calore prodotto dai freni, quale delle due forme di energia sia maggiore. Questo è l'obiettivo dei prossimi paragrafi.

- L'automobile accelera ogni volta nel tempo d/v. Il valore dell'energia convertita dai freni ad ogni arresto è data dalla seguente equazione:

$$\frac{\text{energia cinetica}}{\text{tempo trascorso tra le fermate}} = \frac{\frac{1}{2}m_c v^2}{d/v} = \frac{\frac{1}{2}m_c v^3}{d}, \qquad \text{(A.1)}$$

  dove m_c è la massa dell'auto.

Figura A.1. Una Peugeot 206 ha un coefficiente di resistenza pari a 0.33. Foto per gentile concessione di Christopher Batt.

La formula chiave per molti dei calcoli di questo libro è:

$$\text{energia cinetica} = \frac{1}{2}mv^2.$$

Per esempio, un'automobile di massa $m = 1000\,\text{kg}$, che si muove alla velocità di 100 km all'ora, ossia con $v = 28\,\text{m/s}$, possiede un'energia cinetica pari a

$$\frac{1}{2}mv^2 \simeq 390\,000\,\text{J} \simeq 0.1\,\text{kWh}.$$

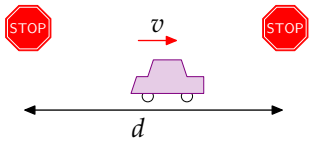


Figura A.2. Schema di riferimento: un'automobile viaggia alla velocità v spostandosi tra due punti, separati da una distanza d, in corrispondenza dei quali si ferma.

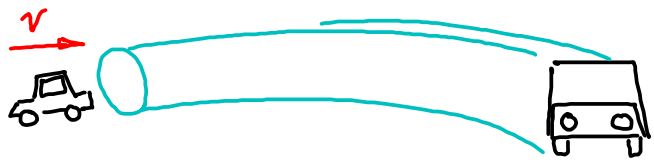


Figura A.3. Un'auto che si sposta ad una velocità v lascia dietro di sè una scia d'aria in movimento; la superficie della sezione verticale della scia, simile ad un tubo, è paragonabile a quella dell'area della superficie frontale dell'auto e la velocità alla quale l'aria si sposta è all'incirca la velocità v.

- Il tubo di aria creato nel tempo t ha un volume pari ad Avt, dove A è l'area della sezione verticale del tubo ed è paragonabile a quella della superficie frontale dell'auto. (Nel caso di un'auto dalla forma affusolata il valore di A è in genere leggermente più piccolo di quello della superficie frontale A_{auto} e il rapporto tra la superficie della sezione verticale del tubo e quella frontale dell'auto è chiamato coefficiente di resistenza aerodinamica e denominato c_{d}. Nelle equazioni che seguono, A si riferisce alla superficie frontale effettiva dell'auto, ossia $c_{\text{d}}A_{\text{car}}$). Il tubo, quindi, ha una massa pari a $m_{\text{aria}} = \rho Avt$ (dove ρ è la densità dell'aria) e l'aria si muove vorticosamente ad una velocità v. In questo modo, l'energia cinetica risulta pari a:

$$\frac{1}{2}m_{\text{aria}}v^2 = \frac{1}{2}\rho Avt\, v^2,$$

e, di conseguenza, la generazione di energia cinetica dell'aria in movimento è nel tempo d/v uguale a:

$$\frac{\frac{1}{2}\rho Avtv^2}{t} = \frac{1}{2}\rho Av^3.$$

Viene impiegata la seguente formula:

massa = densità × volume

Il simbolo ρ ('rho', lettera dell'alfabeto greco) indica la densità.

In questa maniera l'energia prodotta dall'auto è data dalla seguente somma:

$$\begin{aligned} \text{potenza riversata nei freni} \quad &+ \quad \text{potenza riversata nell'aria in movimento} \\ = \tfrac{1}{2}m_{\text{c}}v^3/d \quad &+ \quad \tfrac{1}{2}\rho Av^3. \end{aligned} \tag{A.2}$$

Entrambe le forme di dissipazione dell'energia sono proporzionali a v^3. In questa maniera il modello mostra che se il guidatore diminuisse della metà la propria velocità, la potenza consumata diminuirebbe di 8 volte. In altre parole, alla fine, a parità di distanza percorsa, il viaggio durerebbe due volte tanto, ma l'energia totale consumata sarebbe quattro volte meno.

Per determinare quale delle due forme di dissipazione dell'energia – quella dovuta all'uso dei freni o alla turbolenza dell'aria – sia maggiore, si deve guardare al rapporto

$$(m_{\text{c}}/d)\,/\,(\rho A)\ .$$

Se questo rapporto è maggiore di 1, allora una maggiore potenza viene dissipata dai freni. Se invece il suo valore è minore di 1, allora una maggiore

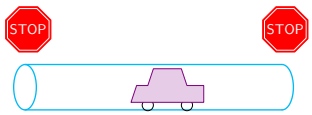


Figura A.4. Al fine di conoscere se il consumo di energia sia maggiormente determinato dall'uso dei freni piuttosto che dalla turbolenza dell'aria, si deve paragonare la massa dell'auto con quella del tubo di aria compreso tra i due punti di arresto.

Figura A.5. La potenza consumata da un'auto differisce se si guida in autostrada o in ciclo urbano. Nel primo caso è proporzionale alla superficie frontale, nel secondo alla massa. Si indovini, guardando la foto, quale sia il veicolo che permette i migliori consumi tra l'auto a sinistra e l'astronave a destra.

potenza viene dissipata dalla turbolenza dell'aria. Dopo facili passaggi algebrici, il rapporto tra le due masse risulta essere maggiore di 1 quando

$$m_c > \rho A d.$$

Come si può notare, Ad è il volume del tubo dell'aria spostata tra un punto di stop e l'altro, mentre $\rho A d$ è la massa del tubo. Si ha, quindi, una semplice relazione, la quale afferma che l'energia dissipata è prevalentemente dovuta all'energia cinetica, che viene trasformata in calore dai freni quando la massa dell'auto è *maggiore* della massa del tubo di aria compreso tra i punti di arresto, mentre vale l'inverso quando la massa dell'auto è *minore* (figura A.4).

Se si volesse calcolare la distanza speciale d^*, compresa tra due segnali di stop, al di sotto della quale la dissipazione tramite i freni è maggiore ed al di sopra della quale quella relativa alla turbolenza dell'aria (conosciuta anche come resistenza dell'aria) è dominante, si dovrebbero fare i seguenti conti. Si supponga che: la superficie frontale di un'auto sia

$$A_{\text{auto}} = 2\,\text{m larghezza} \times 1.5\,\text{m altezza} = 3\,\text{m}^2,$$

il coefficiente di resistenza aerodinamica sia $c_d = 1/3$ e la massa sia pari a $m_c = 1000\,\text{kg}$. Allora questa speciale distanza sarà espressa da:

$$d^* = \frac{m_c}{\rho c_d A_{\text{auto}}} = \frac{1000\,\text{kg}}{1.3\,\text{kg/m}^3 \times \frac{1}{3} \times 3\,\text{m}^2} = 750\,\text{m}.$$

Da questo semplice esempio si vede come nella guida su percorso urbano, dove la distanza tra i punti di arresto risulta essere minore di 750 m, il consumo è legato all'energia cinetica e ai freni. In queste condizioni, se si volesse risparmiare energia, sarebbe una buona idea quella di:

1. ridurre la massa della propria auto;
2. utilizzare un'auto con freni rigenerativi (che all'incirca dimezzano la dissipazione per ogni frenata – si veda su questo punto il Capitolo 20);
3. guidare più piano.

Quando i punti di stop si trovano ad una distanza significativamente maggiore di 750 m, la dissipazione di energia è dominata dalla resistenza dell'aria. In queste condizioni non importa quanto pesi l'auto. In questo caso il consumo sarà lo stesso sia che l'auto abbia un solo passeggero sia che ne abbia sei. In queste condizioni, il consumo di energia può essere abbassato:

1. riducendo il coefficiente di resistenza aerodinamico;
2. riducendo la superficie frontale; o

3. guidando più piano.

Il consumo reale di energia sarà dato dall'energia dissipata descritta nell'equazione A.2, opportunamente moltiplicata per un parametro che tiene conto dell'inefficienza del motore e della trasmissione. In genere un motore a benzina è circa efficiente al 25% . Questo significa che dell'energia chimica che l'auto si beve, tre quarti sono perduti in calore che riscalda il motore e il radiatore, mentre solo un quarto si trasforma in energia "utile":

$$\text{potenza totale di un'auto} \simeq 4\left[\frac{1}{2}m_c v^3/d + \frac{1}{2}\rho A v^3\right].$$

La teoria espressa dalle equazioni sopra riportate può essere verificata utilizzando dei numeri plausibili nel caso di guida lungo strade extraurbane, tipo superstrade o autostrade. In questo caso si possono considerare i seguenti valori: velocità $v = 110\,\mathrm{km/h} = 31\,\mathrm{m/s}$ – che corrisponde alla velocità massima consentita – e $A = c_d A_{car} = 1\,\mathrm{m}^2$. La potenza consumata dal motore è, quindi, circa

$$4 \times \frac{1}{2}\rho A v^3 = 2 \times 1.3\,\mathrm{kg/m^3} \times 1\,\mathrm{m}^2 \times (31\,\mathrm{m/s})^3 = 80\,\mathrm{kW}.$$

Se si guida un'auto a quella velocità per un'ora ogni giorno, allora si percorrono 110 km consumando 80 kWh di energia ogni giorno. Se si riducesse la velocità di marcia della metà, si guiderebbe per due ore ogni giorno percorrendo la stessa distanza, ma si consumerebbe solo 20 kWh di energia. Questo semplice modello teorico è in linea con i consumi riportati nel Capitolo 3. Inoltre, il modello presentato fornisce delle indicazioni su come si potrebbe ridurre il consumo della propria auto, sebbene presenti un paio di approssimazioni che saranno discusse nel prosieguo del capitolo.

Rimane la domanda se sia possibile concepire un'auto che consumi 100 volte meno e possa viaggiare a 110 km/h. La risposta è **No**. In particolare nel caso in cui l'auto mantenga la stessa forma. Percorrendo una superstrada a 110 Km all'ora, l'energia viene dissipata per la maggior parte dalla resistenza dell'aria e anche dei nuovi materiali per costruire l'auto non farebbero molta differenza. Si potrebbe pensare solo ad un miglioramento miracoloso dell'efficienza del motore a combustibile fossile dal 25% al 50%, tale da ridurre il consumo energetico fino ad un valore di circa 40 kWh ogni 100 km.

Le auto elettriche presentano dei vantaggi: mentre il valore del peso del serbatoio dove è stoccata l'energia, tenuto conto solo dei kWh utili, è circa 25 volte maggiore di quello delle auto a benzina, il valore del peso di un motore elettrico è circa 8 volte minore. Inoltre, la catena di trasformazione dell'energia in un'auto elettrica è molto più efficiente, dal momento che può essere efficiente fino al 90%.

Alla fine di questo capitolo viene presentata un'analisi di maggiore dettaglio per le auto elettriche.

Energia per distanza	
Auto a 110 km/h	↔ 80 kWh/(100 km)
Bicicletta a 21 km/h	↔ 2.4 kWh/(100 km)

Aerei a 900 km/h	
A380	27 kWh/100 posti a sedere-km

Tabella A.6. Fatti che merita ricordare: consumo energetico di un'auto.

Coeff. di resistenza aerodinamica	
Modello auto	
Honda Insight	0.25
Prius	0.26
Renault 25	0.28
Honda Civic (2006)	0.31
VW Polo GTi	0.32
Peugeot 206	0.33
Ford Sierra	0.34
Audi TT	0.35
Honda Civic (2001)	0.36
Citroën 2CV	0.51
Ciclista	0.9
Pullman granturismo	0.425
Aerei	
Cessna	0.027
Learjet	0.022
Boeing 747	0.031

Superfici frontali (m^2)	
Land Rover Discovery	1.6
Volvo 740	0.81
Auto media	**0.8**
Honda Civic	0.68
VW Polo GTi	0.65
Honda Insight	0.47

Tabella A.7. Coefficienti di resistenza aerodinamica e superfici frontali.

La bicicletta e il trucchetto del fattore di scala

Se si volesse trovare risposta alla domanda curiosa su quale sia il consumo di energia di una bici espresso in kWh per 100 km, si dovrebbe partire dalla constatazione che muoversi con una bicicletta richiede dell'energia per lo stesso motivo per cui ne ha bisogno un'automobile, vale a dire per muovere l'aria. Si potrebbero rifare tutti i conti daccapo utilizzando i numeri della bici invece che quelli dell'auto. Esiste, però, un semplice trucchetto che permette di ricavare la riposta per la bicicletta a partire da quella per l'automobile. Come si è visto, l'energia consumata da un'automobile, per distanza percorsa, è il consumo di potenza associato alla turbolenza, ossia

$$4 \times \frac{1}{2}\rho A v^3,$$

che divisa per la velocità, v, porta a avere

$$\text{energia per distanza } = 4 \times \frac{1}{2}\rho A v^2,$$

dove, il fattore "4" deriva dall'inefficienza del motore, ρ è la densità dell'aria, $A = c_\mathrm{d} A_\mathrm{car}$ è la superficie frontale dell'auto e v la sua velocità.

Si può paragonare una bicicletta ad un'auto dividendo la formula $4 \times \frac{1}{2}\rho A v^2$ applicata ad una bicicletta per la stessa applicata ad un'auto. In questo modo, stando sopra e sotto la linea di frazione $\frac{1}{2}$ e ρ si elidono, nel caso in cui l'efficienza del motore che brucia le calorie del ciclista sia più o meno pari a quella del motore che brucia le calorie dell'auto, come in effetti è.

Il rapporto si può scrivere allora nel seguente modo:

$$\frac{\text{energia per distanza di una bicicletta}}{\text{energia per distanza di un'automobile}} = \frac{c_\mathrm{d}^\mathrm{bici} A_\mathrm{bici} v_\mathrm{bici}^2}{c_\mathrm{d}^\mathrm{auto} A_\mathrm{auto} v_\mathrm{auto}^2}.$$

Il trucchetto che si può utilizzare a questo punto è quello del "fattore di scala". Se si conosce il modo in cui il consumo di energia aumenta con la velocità e la superficie, allora si riesce a prevedere il consumo di energia di oggetti con differenti velocità e superfici. Nel caso specifico, se si ipotizza che il rapporto tra le superfici frontali sia:

$$\frac{A_\mathrm{bici}}{A_\mathrm{auto}} = \frac{1}{4},$$

dal momento che quattro ciclisti possono sedersi fianco a fianco lungo la larghezza frontale di un'auto e che una bicicletta non è molto affusolata, si ha:

$$\frac{c_\mathrm{d}^\mathrm{bici}}{c_\mathrm{d}^\mathrm{auto}} = \frac{1}{1/3}.$$

Se la velocità di una bicicletta è 21 km/h, allora

$$\frac{v_\mathrm{bici}}{v_\mathrm{auto}} = \frac{1}{5}$$

da cui

$$\begin{aligned}\frac{\text{energia per distanza di una bici}}{\text{energia per distanza di un'auto}} &= \left(\frac{c_{\mathrm{d}}^{\mathrm{bici}}}{c_{\mathrm{d}}^{\mathrm{auto}}}\frac{A_{\mathrm{bici}}}{A_{\mathrm{auto}}}\right)\left(\frac{v_{\mathrm{bici}}}{v_{\mathrm{auto}}}\right)^2 \\ &= \left(\frac{3}{4}\right)\times\left(\frac{1}{5}\right)^2 \\ &= \frac{3}{100}.\end{aligned}$$

Alla fine si è riusciti a stimare che un ciclista che pedala a 21 km/h consuma circa il 3% di energia per chilometro rispetto ad un automobilista solitario su un'autostrada – ossia circa **2.4 kWh per 100 km**.

Pertanto, se ci si chiedesse come poter raggiungere già oggi, per gli spostamenti, un'efficienza 30 volte maggiore di quella di un'auto, la risposta sarebbe semplice: pedalando in bicicletta.

Che dire dell'attrito volvente?

Fino ad ora si sono volutamente ignorati tre tipi di energia: quella consumata dagli pneumatici e dai cuscinetti a sfera dell'auto, quella che viene dissipata con il rumore delle ruote contro l'asfalto e dal consumo della gomma e quella dissipata nei sobbalzi. Tutte insieme queste fonti di dissipazione formano quello che è chiamato *attrito volvente*. Il modello standard dell'attrito volvente afferma che la sua forza è semplicemente proporzionale al peso del veicolo ed è indipendente dalla velocità. La costante di proporzionalità è chiamata coefficiente di attrito volvente ed è denominato f_{v}. In Tabella A.8 sono riportati alcuni valori tipici. Nel caso di un'automobile il coefficiente di attrito volvente vale circa 0.01. In questo caso l'effetto della resistenza al rotolamento equivale a quella opposta da una salita con una pendenza costante dell'1%. Si vede così che l'attrito volvente vale circa 100 newton per tonnellata, indipendentemente dalla velocità. Questo fatto si può verificare di persona spingendo un'automobile del peso di una tonnellata lungo una strada piatta. Una volta messa in moto, si può continuare a spingerla con una sola mano. (100 newton equivalgono al peso di 100 mele.) In questo modo, alla velocità di 31 m/s (110 km/h), la potenza richiesta per vincere l'attrito volvente di un veicolo del peso di

Ruota	f_{v}
Treno (acciaio su acciaio)	0.002
Pneumatico bici	0.005
Pneumatico mezzo pesante	0.007
Pneumatico auto	0.010

Tabella A.8. L'attrito volvente è uguale al peso, espresso in newton, moltiplicato per il coefficiente di attrito volvente, f_{v}. La resistenza al rotolamento tiene conto delle perdite dovute alla flessibilità del cerchione, all'attrito dei cuscinetti a sfera, alle vibrazioni e ai sobbalzi sia della superficie di rotolamento sia del veicolo (inclusa l'energia assorbita da quei componenti preposti ad attenuarli) e allo slittamento sulla strada o sui binari. Il coefficiente dipende dalla qualità della strada, dai materiali con cui è costruita la ruota e dalla temperatura. I numeri riportati a fianco si riferiscono a strade con superfici lisce. [2bhu35]

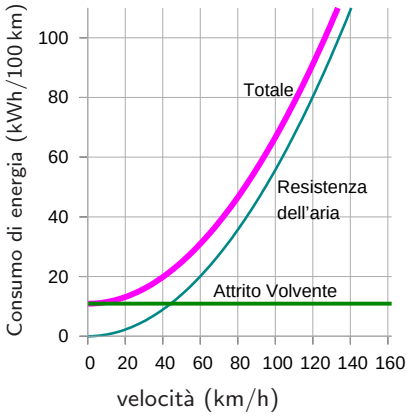


Figura A.9. Modello del consumo di carburante di un'auto, che viaggia a velocità costante, misurato come energia per unità di distanza. Ipotesi impiegate: efficienza del motore 0.25 qualsiasi sia la velocità; $c_d A_{auto} = 1\,m^2$; $m_{auto} = 1000\,kg$; $f_v = 0.01$.

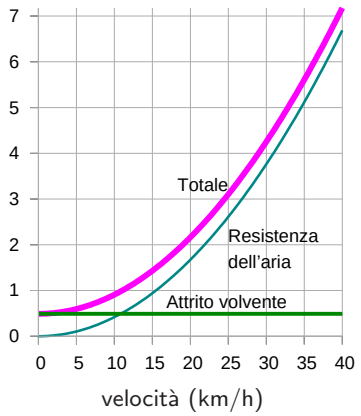


Figura A.10. Modello del consumo di energia di una bicicletta, misurato come energia per distanza. Sull'asse delle ordinate è riportato il consumo di energia in kWh per 100 km. Ipotesi impiegate: efficienza del motore della bici, ossia le gambe del ciclista, 0.25; superficie aerodinamica ciclista $0.75\,m^2$; massa ciclista+bici 90 kg; $f_v = 0.005$.

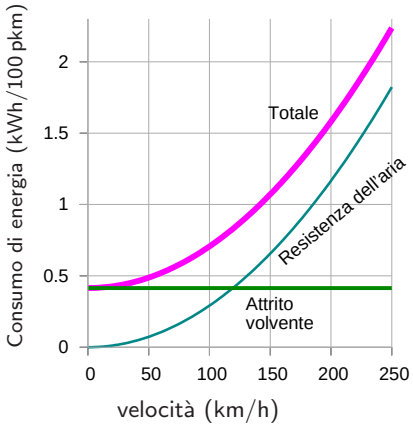


Figura A.11. Modello del consumo di energia *per passeggero* di un treno a otto carrozze e 584 posti a sedere. L'asse delle ordinate riporta il consumo di energia in kWh per 100 passeggeri chilometro, p-km. Ipotesi: efficienza motore del treno 0.90; $c_d A_{treno} = 11\,m^2$; $m_{treno} = 400\,000\,kg$; $f_v = 0.002$.

una tonnellata è pari a

$$\text{forza} \times \text{velocità} \;=\; (100\ \text{newton}) \times (31\,\text{m/s}) \;=\; 3100\,\text{W},$$

che si traduce, in un motore con un'efficienza del 25%, in una potenza richiesta al motore stesso di 12 kW. Ricordando che la potenza richiesta per vincere l'attrito dell'aria è stata stimata essere 80 kW (p. 285), si ha che a velocità elevate circa il 15% della potenza è richiesta per vincere l'attrito volvente.

La figura A.9 mostra come il consumo di carburante (espresso come energia per unità di distanza) sia funzione della velocità di regime quando si considerano gli effetti della resistenza dell'aria e dell'attrito volvente.

La velocità dell'auto alla quale l'azione dell'attrito volvente risulta essere uguale a quella della resistenza dell'aria è data dalla seguente formula:

$$f_v m_{auto} g = \frac{1}{2}\rho c_d A v^2,$$

cioè,

$$v = \sqrt{2\frac{f_v m_{auto} g}{\rho c_d A}} = 13\,\text{m/s} = 47\,\text{km all'ora}$$

Biciclette

Nel caso di una bicicletta ($m = 90\,\mathrm{kg}$, $A = 0.75\,\mathrm{m}^2$), la transizione da una predominanza dell'azione dell'attrito volvente a quella della resistenza dell'aria avviene ad una velocità di circa 12 km/h. Pedalare ad una velocità costante di 20 km/h, costa in termini energetici 2.2 kWh per 100 km. Pertanto, adottando una postura di pedalata aerodinamica, si può ridurre l'area di resistenza e di conseguenza diminuire il consumo di energia di circa 1.6 kWh ogni 100 km.

Treni

Per un treno composto da otto carrozze come mostrato in figura 20.4 ($m = 400\,000\,\mathrm{kg}$, $A = 11\,\mathrm{m}^2$), la velocità al di sopra della quale la resistenza dell'aria è più grande dell'attrito volvente è

$$v = 33\,\mathrm{m/s} = 120\,\mathrm{km\ all'ora}.$$

Per un treno a singola carrozza ($m = 50\,000\,\mathrm{kg}$, $A = 11\,\mathrm{m}^2$), la velocità al di sopra della quale la resistenza dell'aria è maggiore dell'attrito volvente è

$$v = 12\,\mathrm{m/s} = 45\,\mathrm{km\ all'ora}.$$

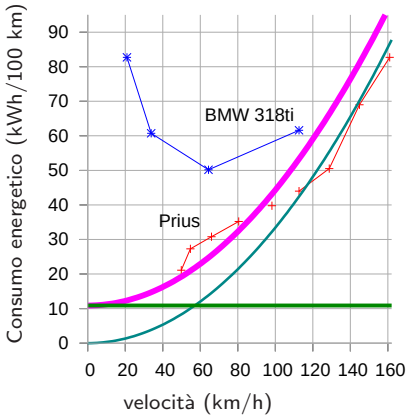


Figura A.12. Il consumo di carburante delle auto attuali non varia con il quadrato della velocità. Dati Prius da B.Z. Wilson; Dati BMW da Phil C. Stuart. La curva liscia mostra l'andamento di una curva che varia con il quadrato della velocità ipotizzando una superficie di resistenza di $0.6\,\mathrm{m}^2$.

Dipendenza della potenza dalla velocità

Quando si afferma che limitando la velocità massima si dovrebbe ridurre il consumo di carburante (in km per litro) di *un quarto* rispetto ai consumi correnti, alcuni si dimostrano scettici. In qualche maniera hanno anche ragione se si considera che la maggior parte dei motori delle auto presentano un funzionamento ottimale rispetto al numero di giri e che la scelta delle marce determina le velocità alle quali l'efficienza ottimale del motore può essere raggiunta. Se l'esperimento di diminuire la velocità massima avvenisse per velocità al di fuori di queste velocità ottimali, il consumo potrebbe non diminuire di quattro volte. L'ipotesi tacita che sottende l'affermazione di cui sopra è che l'efficienza del motore risulta essere la stessa per ogni velocità e per ogni carico e per questo è sempre bene (in termini di km per litro) viaggiare ad andature moderate. Nel caso in cui l'efficienza del motore sia minore a basse velocità, allora la velocità che permette al motore di raggiungere l'efficienza maggiore in termini di consumi dovrebbe essere una velocità intermedia che permette, da un lato, di andare piano e dall'altro di mantenere efficiente il funzionamento del motore. Per esempio nel caso della BMW 318ti riportata in figura A.12, la velocità ottimale è circa 60 km/h. In ogni caso, se si decidesse di limitare le velocità massime delle auto, nulla impedirebbe di ridisegnare motori e marce in maniera che il picco di efficienza del loro funzionamento sia raggiunto alla velocità massima consentita. Come ulteriore controprova che la potenza di un'auto

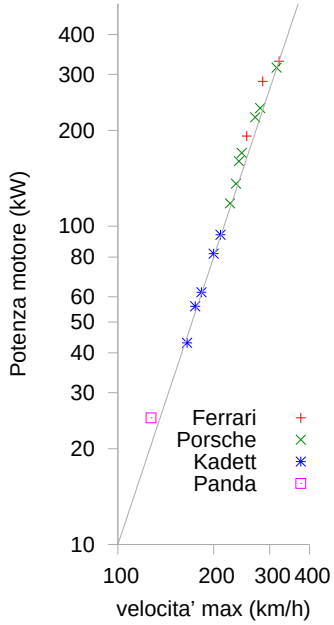


Figura A.13. Potenza delle auto (kW) rispetto alla velocità massima (km/h). Entrambe le scale sono logaritmiche. La potenza aumenta con il cubo della velocità. Per andare due volte più veloce occorre un motore otto volte più potente. Dati tratti da Tennekes (1997).

aumenta con il cubo della velocità si riporta in figura A.13 il grafico della potenza motore in funzione della velocità massima di un certo numero di auto. In modo netto la linea mostra la "relazione proporzionale della potenza con v^3".

Auto elettrica: la distanza massima percorribile è un problema?

Spesso si sente dire che la distanza massima percorribile da un'auto elettrica non è sufficiente. I sostenitori delle auto elettriche, per contro, affermano che non è un problema perchè "basta aggiungere più batterie". Questa affermazione è sicuramente vera ma si deve allora valutare l'effetto delle batterie extra sul consumo totale. La riposta a questo quesito dipende grandemente dall'ipotesi sulla densità di energia che queste batterie presentano. Per una densità di energia di 40 Wh/kg (tipica delle batterie acide al piombo) si può calcolare che difficilmente si raggiunge una distanza massima percorribile superiore ai 200 o 300 km. Nel caso, invece, di densità di energia pari a 120 Wh/kg (tipica di varie batterie al litio) si possono raggiungere facilmente anche 500 km.

Se si ipotizza che il peso complessivo (massa auto più passeggeri) di un'auto elettrica sia di 740 kg, *senza* considerare per il momento il peso delle batterie, si potrebbe studiare l'impatto del peso delle batterie, supponendo vari pesi da 100 kg a 200 kg, da 500 kg fino anche a 1000 kg. Le altre ipotesi dell'esercizio sono: una velocità media di 50 km/h, una superficie di resistenza all'aria di 0.8 m^2; un attrito volvente di 0.01; una distanza media tra due stop di 500 m; un'efficienza del motore elettrico dell'85%; ed infine che, tra una partenza ed un arresto, dei freni rigenerativi siano in grado di recuperare metà della energia cinetica dell'auto. Si può ipotizzare che la ricarica della batteria a partire dalla rete elettrica avvenga con un'efficienza dell'85%. La figura A.14 mostra quanto costa far viaggiare un'auto in funzione della massima distanza percorribile, la quale dipende dal numero di batterie installate a bordo. La curva in alto riporta i risultati di una batteria la cui densità di energia è pari a 40 Wh/kg (tipica delle batteria vecchio stile al piombo). L'autonomia presenta un limite a circa 500 km. Per avvicinarsi il più possibile a questo limite si dovrebbe caricare l'auto di un peso ridicolo per quanto è grande. Ad esempio, per assicurare un'autonomia di 400 km il peso delle batterie raggiungerebbe i 2000 kg con un costo energetico di trasporto superiore a 25 kWh ogni 100 km. Per contro, se ci si accontentasse di un'autonomia di 180 km, il peso delle batterie potrebbe essere 500 kg. I conti si rivelano decisamente più rosei se si decidesse di cambiare tecnologia scegliendo le batterie a ioni di litio, che sono più leggere. In questo caso, avendo una densità di energia pari a 120 Wh/kg, le automobili elettriche con batterie aventi un peso di 500 kg possono facilmente assicurare un'autonomia di 500 km. In questo caso il costo energetico per il trasporto risulta essere di circa 13 kWh ogni 100 km. Si può affermare, quindi, che il problema dell'autonomia di un'au-

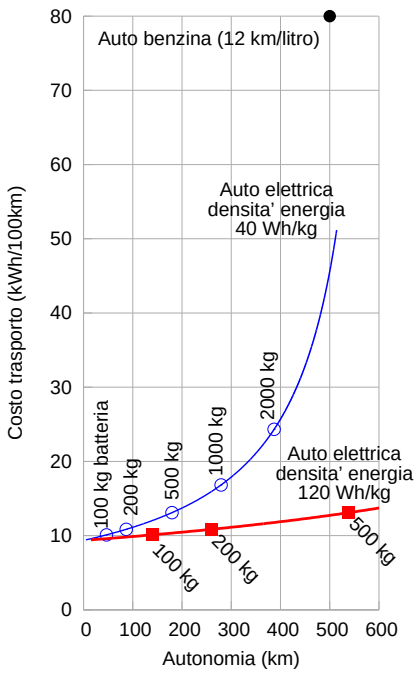


Figura A.14. Grafico dell'autonomia dell'auto elettrica (asse orizzontale) e del costo di trasporto (asse verticale) in funzione della massa delle batterie, per due tecnologie. Un'auto con a bordo 500 kg di batterie di vecchio tipo che presentano una densità di energia pari a 40 Wh per kg, permettono un'autonomia di 180 km. Con lo stesso peso, ma con batterie più moderne che presentano una densità di energia di 120 Wh per kg, un'auto elettrica può percorrere più di 500 km con una sola ricarica. Entrambe le auto pagano un costo di energia di circa 13 kWh ogni 100 km. Queste stime sono basate sull'ipotesi che la batteria sia ricaricabile con un'efficienza dell'85%.

to elettrica sia risolto con l'avvento delle moderne batterie. Se esistesse una tecnologia per le batterie migliore, le cose migliorerebbero ancora, ma una densità di energia di 120 Wh per kg è più che sufficiente, sempre che si reputi ragionevole caricare l'auto con una batteria del peso di 500 kg. Nella pratica, si può pensare che la maggior parte della gente sarebbe più che soddisfatta se fosse garantita almeno un'autonomia di 300 km, un risultato raggiungibile con batterie del peso di 250 kg. Suddividendo queste batterie in dieci pacchi separati, da 25 kg ognuno, con la possibilità di collegarli uno alla volta, basterebbe caricarne a bordo solo quattro, nel caso in cui si prevedesse di percorrere una distanza in linea con quelle normalmente percorse per recarsi al lavoro ogni giorno (100 kg assicurano un'autonomia di 140 km). Nel caso si prevedesse di fare un viaggio più lungo si potrebbero caricare a bordo le rimanenti sei presso una stazione di ricarica batterie. Nel caso di viaggi a lunga percorrenza, si potrebbero cambiare le batterie scariche con quelle cariche circa ogni 300 km, presso stazioni di servizio attrezzate allo scopo.

Figura A.15. Il motore diesel 14 cilindri e due tempi Wartsila-Sulzer RTA96-C. Lunghezza 27 m, altezza 13.5 m. `www.wartsila.com`

Note ed approfondimenti

p.

285 *I motori a benzina presentano un'efficienza del 25% circa.* Encarta [6by8x] riporta che "le efficienze dei moderni motori a scoppio a ciclo otto variano tra 20 e 25%". Il motore a benzina della Toyota Prius, riconosciuto come uno dei motori più efficienti in circolazione, usa il ciclo di Atkinson al posto del ciclo otto e presenta, da un lato, un picco di potenza in uscita pari a 52 kW e, dall'altro, un'efficienza del 34% quando fornisce 10 kW [348whs]. Il più efficiente motore diesel al mondo presenta un'efficienza del 52%, ma non è indicato per le auto, dato che pesa 2300 tonnellate: si tratta del motore turbodiesel Wartsila-Sulzer RTA96-C (figura A.15) che è stato disegnato per navi portacontainer e presenta una potenza in uscita pari a 80 MW.

284 *I freni rigenerativi conservano all'incirca l'energia persa durante la frenata.* Fonte: E4tech (2007).

285 *I motori elettrici possono essere otto volte più leggeri dei motori a benzina.*
Un motore quattro tempi a benzina presenta un rapporto potenza/peso pari a circa 0.75 kW/kg. I migliori motori elettrici presentano un'efficienza del 90% e un rapporto potenza/peso di 6 kW/kg. In questo modo si risparmiano 85 kg di peso con la sostituzione di un motore a benzina da 75 kW con uno elettrico di potenza identica. Purtroppo, però, il rapporto potenza/peso delle batterie è circa 1 kW per kg, portando così a perdere il guadagno in peso di un veicolo elettrico ricavato dalla sostituzione del motore.

288 *Il motore della bici trasforma l'energia con efficienza pari a 0.25.* Questa e altre ipotesi relative all'uso della bici sono confermate da di Prampero et al. (1979). Un ciclista con una postura da corsa presenta una superficie di resistenza pari a $c_d A = 0.3\,\mathrm{m}^2$. L'attrito volvente di un ciclista su una bici da corsa di alta qualità con un peso totale di 73 kg è pari a 3.2 N.

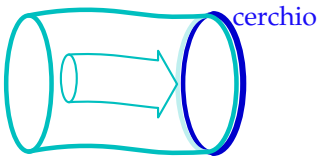
289 *Figura A.12.*
Fonte dati su Prius: B. Z. Wilson [`home.hiwaay.net/~bzwilson/prius/`]. Fonte dati su BMW: Phil C. Stuart [`www.randomuseless.info/318ti/economy.html`].

Letture di approfondimento: Gabrielli and von Kármán (1950).

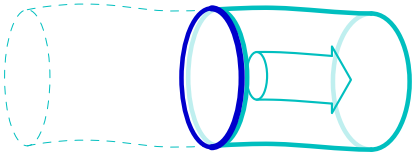
B Eolico II

I principi fisici della potenza del vento

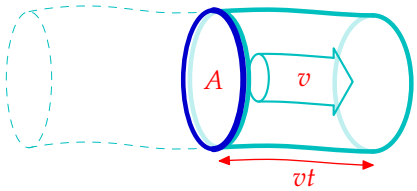
Al fine di stimare l'energia del vento, si supponga di tenere in mano un cerchio con un'area A perpendicolare alla direzione del vento che viaggia ad una velocità v. A questo punto si consideri la massa di aria che passa attraverso il cerchio in un secondo. Qui di sotto viene riportata la massa d'aria appena prima che attraversi il cerchio:



Dopo un secondo la stessa massa di aria si sarà spostata:



La massa di questa porzione di aria risulta essere uguale al prodotto di tre termini: la densità dell'aria ρ, l'area A e la lunghezza che risulta essere uguale alla velocità v moltiplicata per il tempo t, dove t è uguale ad un secondo.



L'energia cinetica di questo volume di aria è

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho Avt\,v^2 = \frac{1}{2}\rho Atv^3. \tag{B.1}$$

In questo modo la potenza dell'aria per una data area A – ovvero l'energia cinetica che passa attraverso quell'area nell'unità di tempo – è pari a:

$$\frac{\frac{1}{2}mv^2}{t} = \frac{1}{2}\rho Av^3. \tag{B.2}$$

La formula usata è ancora:

massa = densità × volume

miglia/ ora	km/h	m/s	Scala Beaufort
2.2	3.6	1	forza 1
7	11	3	forza 2
11	18	5	forza 3
13	21	6	forza 4
16	25	7	
22	36	10	forza 5
29	47	13	forza 6
36	58	16	forza 7
42	68	19	forza 8
49	79	22	forza 9
60	97	27	forza 10
69	112	31	forza 11
78	126	35	forza 12

Figura B.1. Velocità.

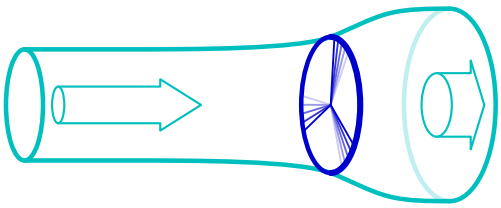


Figura B.2. Flusso d'aria attraverso una girandola. L'aria viene rallentata ed allarga il suo volume dopo aver attraversato le pale della girandola.

Questa formula dovrebbe essere famigliare al lettore, perché è identica a quella dello studio sulla potenza richiesta per muovere un'automobile (si veda p. 283).

Per avere un'idea di quale sia la velocità tipica del vento, si provi a pensare quando pedalando in una giornata ventosa ci si accorge subito della direzione del vento. Se il vento è di spalle, si può procedere più velocemente del normale; la velocità del vento è in quel caso comparabile a quella tipica di un ciclista, che si può assumere essere pari a 21 km all'ora (6 metri al secondo). A Cambridge, il vento solo rare volte è così intenso. In ogni caso si assuma questa velocità come quella tipica in Gran Bretagna (si tratta solo di ricordarsi che probabilmente le stime dovranno essere riviste al ribasso).

La densità dell'aria vale circa 1.3 kg per m^3. (In genere si approssima questo valore a 1 kg per m^3, perché più facile da ricordare anche se nei conti che seguono si userà il valore accurato.) Allora la potenza tipica del vento per metro quadrato della sezione circolare considerata risulta essere

$$\frac{1}{2}\rho v^3 = \frac{1}{2} 1.3\,\mathrm{kg/m^3} \times (6\,\mathrm{m/s})^3 = 140\,\mathrm{W/m^2}. \tag{B.3}$$

Non tutta questa energia può essere convertita da una girandola che venga posta all'interno del cerchio. La turbina rallenta molto l'aria, ma deve lasciarla anche con una *certa* quantità di energia cinetica. In caso contrario il flusso si bloccherebbe: l'aria già passata attraverso la sezione occupata dal rotore ostruirebbe il passaggio di quella entrante. In Figura B.2 si riporta lo schema del flusso che passa attraverso la girandola. La massima porzione di energia entrante che può essere convertita dalle pale di una girandola fu studiata nel 1919 da un fisico tedesco, che si chiamava Albert Betz. Se la velocità del vento in uscita è un terzo di quella in ingresso, l'energia estratta è 16/27, vale a dire 0.59 volte il valore dell'energia totale del vento. In pratica, si può assumere che la girandola sia efficiente al 50%. Nei fatti, le turbine eoliche sono progettate per funzionare quando si hanno velocità del vento ben determinate; se la velocità del vento risulta essere significativamente superiore a quella per cui è stata progettata, la turbina viene messa in posizione di riposo.

Come esempio si ipotizzi che le pale abbiano un diametro $d = 25\,\mathrm{m}$ e che il pilone dell'aerogeneratore sia alto 32 m. Queste sono circa le dimensioni della turbina eolica che troneggia isolata sopra la città di Wellington, in Nuova Zelanda (figura B.3). La potenza della turbina eolica è espressa

Figura B.3. La turbina eolica Brooklyn sulle alture di Wellington in Nuova Zelanda, con alla base un gruppo di persone che funge da scala di riferimento per le sue dimensioni. Foto scattata da Philip Banks, in una giornata ventosa, mentre la turbina stava producendo 60 kW, (1400 kWh al giorno).

dall'equazione

$$\begin{aligned} & \text{fattore di efficienza} \times \text{potenza per unità di superficie} \times \text{area} \\ = \; & 50\% \times \frac{1}{2}\rho v^3 \times \frac{\pi}{4} d^2 && \text{(B.4)} \\ = \; & 50\% \times 140\,\mathrm{W/m^2} \times \frac{\pi}{4}(25\,\mathrm{m})^2 && \text{(B.5)} \\ = \; & 34\,\mathrm{kW}. && \text{(B.6)} \end{aligned}$$

In una giornata ventosa ho avuto l'opportunità di visitare quella turbina eolica e di verificare che il contatore segnasse 60 kW.

Al fine di stimare quanta potenza si può ricavare dal vento si deve decidere, da un lato, quanto le pale devono essere grandi e, dall'altro, a che distanza si possono sistemare le torri una dall'altra.

Quanto vicine le turbine eoliche possono essere posizionate? Nel caso in cui fossero poste troppo vicine, quelle in testa metterebbero in ombra di vento quelle dietro. Gli esperti consigliano di non mettere un'aerogeneratore vicino all'altro con una distanza inferiore a 5 volte il diametro delle loro pale, altrimenti si avrebbero perdite di potenza significative. Fissata questa distanza, la potenza che l'insieme delle turbine eoliche di un parco eolico può generare per unità di superficie di terreno risulta essere:

$$\begin{aligned} \frac{\text{potenza per turbina eolica (B.4)}}{\text{superficie di terreno per turbina eolica}} &= \frac{\frac{1}{2}\rho v^3 \frac{\pi}{8} d^2}{(5d)^2} && \text{(B.7)} \\ &= \frac{\pi}{200}\frac{1}{2}\rho v^3 && \text{(B.8)} \\ &= 0.016 \times 140\,\mathrm{W/m^2} && \text{(B.9)} \\ &= 2.2\,\mathrm{W/m^2}. && \text{(B.10)} \end{aligned}$$

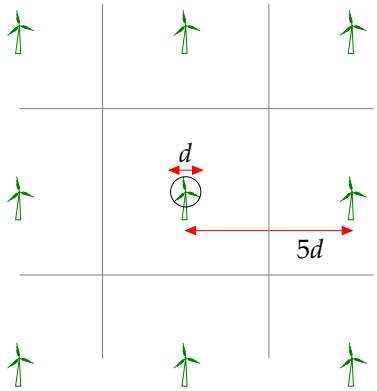


Figura B.4. Disposizione di un parco eolico .

Potenza per unità di superficie	
parco eolico (velocità vento 6 m/s)	2 W/m^2

Tabella B.5. Fatti che meritano di essere memorizzati: parco eolico.

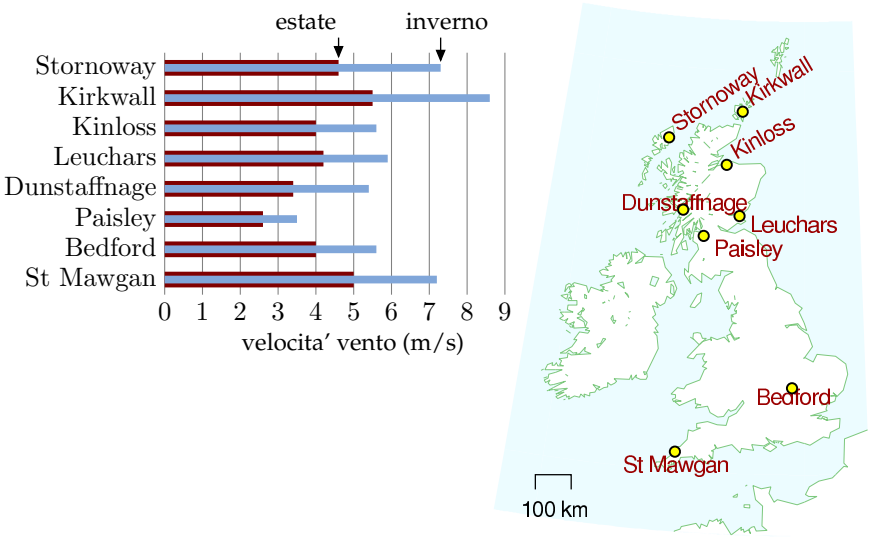


Figura B.6. Velocità media del vento in estate (linea scura) e in inverno (linea chiara) in otto località della Gran Bretagna. Le velocità sono state misurate da stazioni poste ad un'altezza di 10 metri dal suolo. Le medie si riferiscono al periodo 1971–2000.

Questo ultimo numero merita di essere memorizzato: un parco eolico attraversato da un vento con velocità di 6 m/s genera una potenza di 2 W per m^2 di superficie di terreno occupato. Si noti che la risposta non dipende dal diametro delle pale delle turbina. L'effetto dei diametri d si cancella, perché pale più lunghe richiedono di essere posizionate su una più ampia superficie. Aerogeneratori più grandi possono essere una buona idea se si vuole catturare le velocità del vento a quote più elevate (infatti tanto più alta è la torre quanto più intensa è la velocità del vento che incontra), oppure se si ragiona in termini di economia di scala, ma queste sono le sole due motivazioni per scegliere turbine molto grandi. Questa stima dipende sensibilmente da quella della velocità del vento. Ci si potrebbe chiedere se una velocità di 6 m/s sia plausibile come valore medio sul lungo periodo nelle regioni ventose del Regno Unito. Le Figure 4.1 e 4.2 mostrano i valori della velocità del vento a Cambridge e a Cairngorm. La Figura B.6 mostra la velocità media invernale ed estiva del vento in altre otto località della Gran Bretagna. Come si può ben vedere, utilizzare per le stime il valore di 6 m/s come velocità media del vento, è una sovrastima per gran parte del Regno Unito! Se si sostituisce il valore di 6 m/s con quello rilevato nella cittadina di Bedford, ossia 4 m/s, allora la stima deve essere rivista al ribasso, moltiplicando per un fattore $(4/6)^3 \simeq 0.3$. (Si ricordi sempre che la potenza del vento varia col cubo della sua velocità.) D'altra parte per stimare la potenza media del vento correttamente, piuttosto che considerare il valore medio nel tempo della sua velocità ed elevarlo al cubo, si dovrebbe calcolare la media aritmetica delle velocità rilevate in tempi diversi ed elevate al cubo. Infatti, la media aritmetica dei valori elevati al cubo è maggiore del cubo delle medie. Ma se si inizia ad entrare in tutti questi piccoli dettagli, le cose possono risultare ancora più complicate dal momento che le turbine eoliche nella pratica non forniscono sempre una potenza proporzionale al cubo della velocità del vento. Nei fatti, solo all'interno di un dato intervallo di velocità del vento producono questa potenza ideale. A velocità superiori o inferiori di detto intervallo una potenza minore di quella ideale viene fornita.

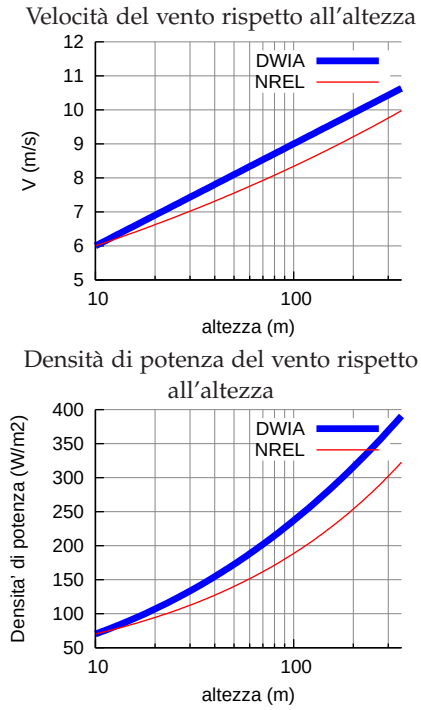


Figura B.7. In alto: due modelli per descrivere la velocità e la potenza del vento in funzione della altezza. DWIA = Danish Wind Industry Association; NREL = National Renewable Energy Laboratory. Per ogni modello la velocità all'altezza di 10 m è stata fissata a 6 m/s. Secondo il modello danese, la lunghezza di rugosità è pari a $z_0 = 0.1$ m. In basso: la densità di potenza (potenza per unità di area verticale) secondo i due modelli.

Variazione della velocità del vento rispetto all'altezza

Maggiore è l'altezza dell'aerogeneratore e maggiore è la velocità del vento che le sue pale incontrano. La modalità con cui la velocità del vento aumenta con l'altezza dal suolo è complicata e dipende dalle asperità del terreno attorno e dall'ora del giorno. Accontentandosi di una valutazione spannometrica, si può affermare che al raddoppiare dell'altezza, la velocità del vento aumenta del 10%, e di conseguenza la potenza del 30%.

La relazione tra la velocità v e l'altezza z, detta anche profilo verticale di velocità o *wind shear* [con riferimento al livello di turbolenza. (N.d.T.)], viene descritta da due equazioni:

Figura B.8. La turbina qr5 da `quietrevolution.co.uk`. Una turbina atipica.

1. la formula proposta da NREL [ydt7uk], secondo cui la velocità varia con la potenza dell'altezza:

$$v(z) = v_{10}\left(\frac{z}{10\,\mathrm{m}}\right)^{\alpha},$$

dove v_{10} è la velocità all'altezza di 10 m e un valore tipico dell'esponente α è 0.143, ossia 1/7. Per esempio, la "legge empirica dell'un settimo" ($v(z)$ proporzionale a $z^{1/7}$) è usata in Elliott et al. (1991).

2. La formula tratta dalla Danish Wind Industry Association [yaoonz] secondo cui

$$v(z) = v_{\mathrm{rif}}\frac{\log(z/z_0)}{\log(z_{\mathrm{rif}}/z_0)},$$

dove z_0 è un parametro chiamato lunghezza di rugosità [i.e. l'altezza caratteristica degli ostacoli al suolo. (N.d.T.)] e v_{rif} è la velocità ad una altezza di riferimento z_{rif}, ad esempio, di 10 m. Il valore medio di z_0 in zone rurali (dove si hanno terreni agricoli con case o ripari ad intervalli di 500 metri – "classe di rugosità 2") è pari a 0.1 m.

In pratica, le due formule che descrivono il profilo verticale della velocità del vento forniscono risultati numerici simili. Tuttavia, questo fatto non deve far pensare che siano accurate per ogni situazione, momento della giornata o periodo dell'anno. Van den Berg (2004) sostiene, ad esempio, che spesso di notte si hanno differenti profili.

Proprietà standard di un aerogeneratore

Un aerogeneratore moderno presenta in media un rotore con un diametro di circa 54 metri centrato ad un'altezza di 80 metri dal suolo; questa macchina ha una "capacità" di 1 MW. I termini "capacità" o "potenza di picco" si riferiscono alla potenza *massima* che la turbina può generare in condizioni ideali. In genere, le turbine eoliche sono progettate, da un lato, per funzionare a partire da velocità del vento comprese tra 3 e 5 m/s e, dall'altro, per arrestarsi quando questa raggiunge valori tipici di un fortunale, ovvero 25 m/s. La potenza media reale prodotta è data dal prodotto

della "capacità" per un parametro che tiene conto delle frazioni di tempo durante le quali le condizioni di vento sono vicine a quelle di progetto. Questo parametro, chiamato talvolta "fattore di carico" o anche "fattore di capacità", dipende dalla posizione geografica; un valore medio del fattore di carico per un sito nel Regno Unito considerato *buono* è 30%. In Olanda, questo è 22%, mentre in Germania 19%.

Altre stime di potenza di un parco eolico per unità di superficie

In uno studio del Governo inglese [`www.world-nuclear.org/policy/DTI-PIU.pdf`] si riporta che il valore della potenza per unità di superficie di un parco eolico su terraferma nel Regno Unito è per lo meno pari a 9 W/m^2 (attenzione, questo dato si riferisce alla capacità, non alla produzione media). Supponendo un fattore di capacità pari al 33%, la potenza media prodotta è 3 W/m^2.

London Array è un parco eolico sul mare in via di realizzazione appena fuori l'estuario del fiume Tamigi. Con la sua capacità di 1 GW sarà il parco eolico più grande del mondo. Alla fine dei lavori saranno installate 271 turbine eoliche su una superficie di 245 km^2 [`6o86ec`] e la potenza media sarà di 3100 GWh all'anno (350 MW). (Costo previsto 1.5 miliardi di sterline.) Con questi numeri la potenza per unità di superficie risulta essere 350 MW/245 km^2 = 1.4 W/m^2. Come si vede questo numero è inferiore a quello dei parchi eolici su terraferma e probabilmente penso che questo fatto sia legato alla scelta del sito, che comprende anche il grande canale Knock Deep, troppo profondo (circa 20 m) per piantarci in maniera economica delle turbine. [Nel 2013 una prima porzione del parco è stato inaugurata in cui sono presenti 175 turbine Siemens SWT-3.6 (630 MWp). (N.d.T.)]

> *Sono più preoccupato oggi per questi piani [con riferimento al progetto del parco eolico London Array] e per quello che faranno al paesaggio e al nostro modo di vivere, di quanto non lo fossi a suo tempo a proposito di un eventuale sbarco nazista sulle nostre spiagge.*
>
> Bill Boggia, abitante di Graveney, dove è previsto che i cavi sottomarini ad alta tensione del parco eolico vengano collegati alla rete elettrica nazionale.

Figura B.9. Una micro-turbina Ampair da "600 W". La potenza media generata da questa micro turbina montata nella ciitadina di Leamington Spa è di 0.037 kWh al giorno (1.5 W).

Domande

E la micro-generazione? Se uno installasse una di quelle mini-turbine sul tetto di casa, quanta energia potrebbe aspettarsi di produrre?

Se si suppone che, da un lato, la velocità del vento sia di 6 m/s, valore che, come si è visto, *supera* quello medio di molte località inglesi, e dall'altro, che il diametro sia pari a 1 m, allora la potenza prodotta sarebbe

di 50 W. Questo valore equivale a 1.3 kWh al giorno – decisamente pochino. In realtà, più realisticamente, una micro turbina posta in una ambiente urbano medio inglese produce appena 0.2 kWh al giorno – si veda, ad esempio, p. 74.

Forse le peggiori turbine eoliche del mondo si trovano a Tsukuba City in Giappone, dove addirittura consumano più energia di quanta ne generano. Chi le aveva installate fu così imbarazzato dal fatto che stavano quasi sempre ferme, che decise di fornirgli dell'energia per farle ruotare, in maniera che sembrasse che funzionassero per davvero! [6bkvbn]

Figura B.10. Un turbina Iskra A da 5 kW e 5.5 m di diametro [www.iskrawind.com] durante le operazioni di manutenzione annuale. Questa turbina, collocata nella regione del Hertfordshire (sicuramente non una delle località più ventose dell'Inghilterra) e montata ad un altezza da terra di 12 m, produce in media 11 kWh al giorno. Un parco eolico costruito con queste macchine posizionate una per ogni quadrato di 30 m × 30 m , fornirebbe una potenza per unità di superficie di 0.5 W/m^2.

Note ed approfondimenti

p.

294 *La massima porzione di energia entrante che può essere convertita dalle pale di una girandola...* Sul sito della Danish Wind Industry Association viene fornita un'elegante spiegazione di questo fatto. [yekdaa].

297 *In genere, le turbine eoliche sono progettate, da un lato, per funzionare a partire da velocità del vento comprese tra 3 e 5 m/s.* [ymfbsn].

298 *Un valore medio del fattore di carico per un sito considerato buono nel Regno Unito è del 30%.* Nel 2005, il valore medio di carico dei principali parchi eolici è stato 28% [ypvbvd]. Questo valore è variato durante l'anno raggiungendo nei mesi di giugno e luglio il valore minimo di 17%. Il fattore di carico delle migliori regioni inglesi – la contea di Caithness e le isole Orcadi e Shetland – è stato 33%. Sempre nel 2005, i valori del fattore di carico di due parchi eolici offshore sono stati, rispettivamente 36% per North Hoyle (nel Mare del Nord del Galles) e 29% per Scroby Sands (nel mare di fronte a Great Yarmouth). Nel 2006, i valori medi dei fattori di carico misurati per dieci regioni inglesi sono stati: Cornovaglia 25%; Mid-Wales 27%; Regione di Cambridge e Norfolk 25%; Cumbria 25%; Durham 16%; Scozia meridionale 28%; isole Orcadi e Shetland 35%; Scozia settentrionale 26%; Irlanda del Nord 31%; in mare aperto 29%. [wbd8o]

Watson et al. (2002) riporta che il valore medio delle velocità del vento per assicurare uno sfruttamento commerciale dell'energia eolica è di 7.0 m/s. Nel Regno Unito circa il 33% del territorio presenta questi valori.

C Aerei II

Quello di cui abbiamo bisogno è vedere come rendere più efficienti i viaggi aerei e come sviluppare nuovi carburanti che ci permettano di consumare meno energia e abbassare le emissioni.

Tony Blair

La speranza in un futuro migliore non è una linea politica. È un illusione.

Emily Armistead, Greenpeace

Figura C.1. Volatili: partendo dall'alto due sterne codalunga, una pittima minore e un Boeing 747.

Quali sono i limiti fondamentali del trasporto aereo? Le Leggi della Fisica che sottendono al volo, richiedono necessariamente il consumo di una certa quantità di energia per tonnellata trasportata e per chilometro volato? Qual è la distanza massima che un Boeing 747 del peso di 300 tonnellate può coprire volando senza scalo? E quella di una pittima minore del peso di un chilogrammo o quella di una sterna codalunga del peso di cento grammi?

Al Capitolo 3, nel quale si è stimato il consumo di carburante delle automobili, è seguito il Capitolo A, in cui si è introdotto un modello che spiegasse dove l'energia va a finire nelle auto; allo stesso modo questo capitolo fa da corollario al Capitolo 5, presentando che fine faccia l'energia in un aeroplano. Le sole leggi fisiche che saranno richiamate, quando necessario, sono quelle del moto descritte da Newton.

Lo scopo di questa esposizione è quello di permettere di rispondere a domande come "volare richiederebbe molta meno energia se viaggiassimo in un aereo spinto da motori più lenti?". Molte equazioni saranno riportate nel corso del capitolo. Spero che vi piacciano.

Come si vola

Gli aeroplani (e gli uccelli) si muovono attraverso l'aria e, esattamente come le auto e i treni, subiscono una forza di resistenza, cosicché i volatili consumano molta della loro energia per vincere questa forza contraria al moto. Inoltre, rispetto alle auto e ai treni, gli aerei devono consumare energia anche *per rimanere sollevati da terra*.

Gli aerei rimangono sospesi in aria spingendo l'aria verso il basso. In questo modo l'aria spinge l'aereo in alto, come ci dice la terza legge di Newton. Fino a quando questa spinta, che è chiamata portanza, rimane sufficientemente grande da bilanciare la spinta verso il basso, determinata dal peso dell'aereo, questo evita di cadere al suolo.

Quando l'aereo spinge l'aria verso il basso, fornisce a questa dell'energia cinetica. In questo modo la creazione della portanza implica una

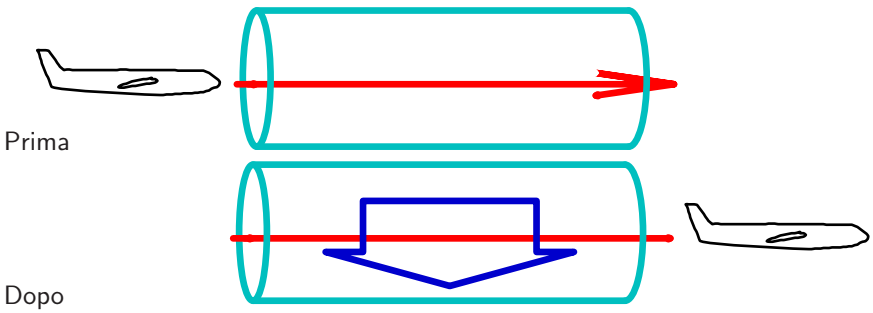


Figura C.2. Un aereo incontra nel suo moto un tubo stazionario di aria. Una volta superato, l'aria viene spinta verso il basso dall'aereo. La forza esercitata dall'aereo sull'aria per accelerarla verso il basso è uguale e contraria alla forza verso l'alto esercitata dall'aria sull'aereo.

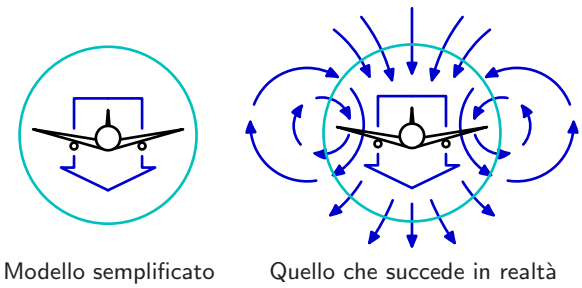


Figura C.3. L'ipotesi fatta prevede che l'aereo lasci sulla scia del suo moto una sorta di salsicciotto di aria in movimento verso il basso. Nella realtà avvengono dei movimenti turbolenti più complessi. La figura C.4 presenta con maggiore precisione quello che avviene.

trasformazione di energia. La potenza totale richiesta dall'aereo risulta essere la somma tra la potenza richiesta per generare la portanza e quella per vincere la resistenza al moto.

(Nota Bene: la potenza per generare la portanza è generalmente chiamata "resistenza indotta", anche se nel seguito della trattazione ci si riferirà ad essa come potenza della portanza, P_{portanza}.)

Le due equazioni necessarie per descrivere la teoria del volo sono la seconda legge di Newton:

$$\text{forza} = \text{tasso di variazione della quantità di moto}, \tag{C.1}$$

e la terza legge di Newton, già menzionata sopra:

$$\text{forza esercitata su A da B} = -\,\text{forza esercitata su B da A}. \tag{C.2}$$

Nel caso in cui non vi piacessero le equazioni, eccovi svelato subito il risultato finale di tanta matematica: la potenza richiesta per generare la portanza è *uguale* a quella richiesta per vincere la resistenza al moto. In questo modo il fatto di "stare in aria" *raddoppia* la domanda di potenza.

Si consideri un modello semplificato della forza di portanza su di un aereo che viaggi alla velocità v. In un dato tempo t l'aereo copre una distanza vt e lascia dietro di sè una sorta di salsicciotto di aria in movimento verso il basso (figura C.2). Se si denota la sezione di questo salsicciotto A_s, allora il suo diametro è all'incirca uguale all'apertura alare w dell'aereo. All'interno di questo salsicciotto ne troviamo uno più piccolo composto da aria in regime turbolento, con una sezione simile all'area frontale del

corpo dell'aereo stesso. In realtà, se si guardano i dettagli del flusso di aria generato, si vedono cose più accattivanti di quelle mostrate dal modello semplificato: ogni estremità alare lascia dietro di sé un vortice che permette all'aria compresa tra le estremità alari stesse di scendere verso il basso rapidamente, mentre permette all'aria oltre/fuori dalle estremità alari di muoversi verso l'alto (si vedano le Figure C.3 e C.4). Questo movimento di aria verso l'alto viene utilizzato dagli uccelli quando volano in formazione: appena dietro l'estremità dell'ala è presente una piccola simpatica corrente ascensionale. Dopo questo inciso, ritorniamo al nostro salsicciotto.

Figura C.4. Scia di aria lasciata da un aereo. Foto della NASA, Langley Research Center.

La sua massa è uguale a:

$$m_{\text{salsicciotto}} = \text{densità} \times \text{volume} = \rho v t A_s. \tag{C.3}$$

Se si ipotizza che si stia muovendo verso il basso ad una velocità u, allora si può calcolare quale valore deve avere u affinché l'aereo riceva una forza di portanza uguale al suo peso mg. La spinta verso il basso creata al tempo t dal salsicciotto risulta essere

$$\text{massa} \times \text{velocità} = m_{\text{salsicciotto}} u = \rho v t A_s u. \tag{C.4}$$

In virtù delle leggi di Newton questo valore deve essere uguale alla forza esercitata dal peso dell'aereo al tempo t, ovvero,

$$mgt. \tag{C.5}$$

Rimaneggiando l'equazione,

$$\rho v t A_s u = mgt, \tag{C.6}$$

si può trovare la velocità verso il basso del salsicciotto

$$u = \frac{mg}{\rho v A_s}.$$

Interessante! La velocità del salsicciotto è *inversamente* proporzionale a quella dell'aereo v. Questo significa che un aereo che vola piano deve spingere più aria verso il basso rispetto ad uno che vola più veloce e questo perché incontra nel suo cammino meno aria in una data unità di tempo. Questa è la ragione per la quale un aereo che sta atterrando, e quindi vola ad una velocità ridotta, tira su i *flap*, che hanno appunto la funzione di creare una superficie alare più grande e ripida in grado di deflettere più aria verso il basso. Qual è il costo energetico per spingere verso il basso il salsicciotto di aria alla velocità u? La potenza richiesta è

$$P_{\text{portanza}} = \frac{\text{energia cinetica del salsicciotto}}{\text{tempo}} \tag{C.7}$$

$$= \frac{1}{t}\frac{1}{2} m_{\text{salsicciotto}} u^2 \tag{C.8}$$

$$= \frac{1}{2t} \rho v t A_s \left(\frac{mg}{\rho v A_s}\right)^2 \tag{C.9}$$

$$= \frac{1}{2}\frac{(mg)^2}{\rho v A_s}. \tag{C.10}$$

La potenza totale richiesta per mantenere l'aereo in volo risulta, quindi, dalla somma di quella per vincere la resistenza al moto e di quella di portanza:

$$P_{\text{totale}} = P_{\text{resistenza}} + P_{\text{portanza}} \tag{C.11}$$

$$= \frac{1}{2} c_{\text{d}} \rho A_{\text{p}} v^3 + \frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v A_{\text{s}}}, \tag{C.12}$$

dove A_{p} è la superficie frontale dell'aereo e c_{d} è il coefficiente di resistenza (come già visto nel Capitolo A).

Dunque, sarebbe possibile stimare il consumo di carburante, espresso come energia consumata per distanza percorsa, come

$$\left.\frac{\text{energia}}{\text{distanza}}\right|_{\text{ideale}} = \frac{P_{\text{totale}}}{v} = \frac{1}{2} c_{\text{d}} \rho A_{\text{p}} v^2 + \frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_{\text{s}}}, \tag{C.13}$$

se l'aereo convertisse tutta la potenza del carburante in quella per vincere la resistenza al moto e in quella di portanza, in maniera perfettamente efficiente.

Nota Bene: un altro modo di chiamare l'"energia consumata per distanza percorsa" è "forza". Si possono riconoscere i due termini riportati sopra come la forza della resistenza $\frac{1}{2} c_{\text{d}} \rho A_{\text{p}} v^2$ e la forza di portanza $\frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_{\text{s}}}$. La somma delle due è a sua volta la forza , o "spinta" che specifica esattamente quanto i motori devono, per l'appunto, spingere.

Dal momento che i motori a turbina presentano un'efficienza reale di circa $\epsilon = 1/3$, allora l'energia per distanza consumata da un aereo che sta viaggiando ad una velocità v è

$$\frac{\text{energia}}{\text{distanza}} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{1}{2} c_{\text{d}} \rho A_{\text{p}} v^2 + \frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_{\text{s}}} \right). \tag{C.14}$$

Questa equazione è abbastanza complicata, ma si semplifica enormemente se si assume che l'aereo sia stato *progettato* per volare alla velocità che *minimizza* il consumo di energia per distanza. Come si vede, l'energia ha la pregevole caratteristica di essere funzione della velocità v (si veda la Figura C.5). Allora la somma delle due quantità $\frac{1}{2} c_{\text{d}} \rho A_{\text{p}} v^2$ e $\frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_{\text{s}}}$ diventa minima quando queste sono di uguale grandezza. Questo fenomeno è per fortuna comune in fisica ed ingegneria: due cose che non *devono* per nessuna ragione ovvia essere uguali tra loro invece lo *sono*, almeno per un valore non più del doppio.

In questo modo, questo principio di uguaglianza tra le componenti ci dice che la velocità ottimale per un aereo è tale che

$$c_{\text{d}} \rho A_{\text{p}} v^2 = \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_{\text{s}}}, \tag{C.15}$$

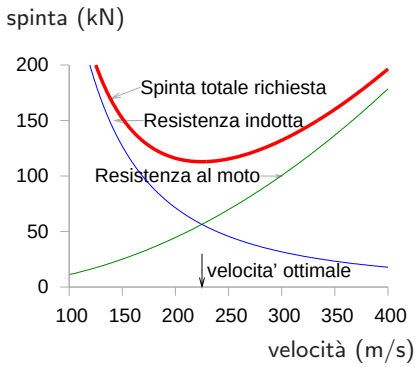


Figura C.5. La forza richiesta per far continuare a volare un aereo in funzione della sua velocità v, è data dalla somma di una normale forza per vincere la resistenza al moto $\frac{1}{2} c_{\text{d}} \rho A_{\text{p}} v^2$ – che aumenta con la velocità – e della forza relativa alla portanza (conosciuta anche come resistenza indotta) $\frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_{\text{s}}}$ – che diminuisce con la velocità. Esiste, quindi, una velocità ideale , v_{ottimale}, alla quale la forza richiesta è la minima possibile. Poiché la forza è definita anche come energia per la distanza, allora diminuendo questa si diminuisce anche il carburante necessario a percorrere quella stessa distanza. Si viaggi quindi alla velocità v_{ottimale} se si vuole ottimizzare l'efficienza nei consumi di carburante. Questo grafico mostra la stima, basata sul modello semplificato, della spinta richiesta espressa in chilonewton, per un Boeing 747 dalla massa di 319 t, apertura alare di 64.4 m, coefficiente di resistenza al moto di 0.03 e superficie frontale di 180 m^2, che sta viaggiando in un strato di aria di densità $\rho = 0.41\,\text{kg/m}^3$ (questo valore si riferisce alla densità ad un'altezza di 10 km), in funzione della sua velocità v espressa in m/s. Il modello presenta un punto di ottimo in corrispondenza di una velocità $v_{\text{ottimale}} = 220\,\text{m/s}$ (790 km/h). Per essere un modello semplificato basato su un salsicciotto, il risultato ricavato rispecchia bene quello che succede nella realtà!

Volatile		747	Albatros
Progettista		Boeing	selezione naturale
Massa (a pieno carico)	m	363 000 kg	8 kg
Apertura alare	w	64.4 m	3.3 m
Superficie⋆	A_p	180 m^2	0.09 m^2
Densità	ρ	0.4 kg/m^3	1.2 kg/m^3
Coeff. di resistenza al moto	c_d	0.03	0.1
Velocità ottimale	v_{opt}	220 m/s = 790 km/h	14 m/s = 50 km/h

Tabella C.6. Stima della velocità ottimale per un jumbo jet e un albatros.
⋆ Stima della superficie frontale di un 747 basata sul valore doppio della larghezza della cabina (6.1 m) moltiplicato per l'altezza della fusoliera (10 m), al fine di di considerare la superficie frontale dei motori, delle ali e della coda. Il valore di quella dell'albatros è stato stimato a partire da una fotografia.

ossia

$$\rho v_{opt}^2 = \frac{mg}{\sqrt{c_d A_p A_s}}. \tag{C.16}$$

Questo risultato definisce la velocità ottimale se il nostro modello semplificato di volo è accurato. Il modello non è più valido se l'efficienza del motore ϵ dipende fortemente dalla velocità o se la velocità dell'aereo è superiore a quella del suono (330 m/s [1200 km/h. (N.d.T.)]). A velocità supersoniche si ha bisogno di ricorrere ad un differente modello di descrizione della resistenza al moto e della portanza.

Controlliamo ora il nostro modello andando a calcolare quali sono le velocità ottimali per un 747 e un albatros. In questo caso si deve fare attenzione ad usare il valore corretto di densità dell'aria: nel caso di un 747 la velocità di crociera ottimale si riferisce ad un'altezza di diecimila metri, ci si deve, quindi, ricordare che la densità dell'aria diminuisce con il crescere dell'altitudine z secondo la funzione $\exp(-mgz/kT)$, dove m è la massa delle molecole di azoto o ossigeno e kT è un fattore di scala che tiene conto dell'energia termica (i.e. la costante di Boltzmann moltiplicata per la temperatura espressa in gradi assoluti). In questo caso la densità è circa 3 volte più piccola.

Le velocità ottimali stimate sono (tabella C.6) più accurate di quanto ci si potesse aspettare! Quella del 747 è stimata essere 790 km/h, e quella dell'albatros 50 km/h – entrambi i valori sono molto vicini alle velocità di crociera dei due volatili: rispettivamente 900 km/h e 48-88 km/h.

Proseguiamo l'analisi dei risultati del modello semplificato. Si può verificare se la forza (C.13) è in linea con quelle conosciute del 747. Come visto in precedenza, alla velocità ottimale le due forze sono uguali, quindi basta calcolare il valore di una per poi moltiplicarlo per due:

$$\text{forza} = \left.\frac{\text{energia}}{\text{distanza}}\right|_{\text{ideale}} = \frac{1}{2}c_d\rho A_p v^2 + \frac{1}{2}\frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_s} \tag{C.17}$$

$$= c_d\rho A_p v_{\text{ottimale}}^2 \tag{C.18}$$

$$= c_d\rho A_p \frac{mg}{\rho(c_d A_p A_s)^{1/2}} \tag{C.19}$$

$$= \left(\frac{c_\mathrm{d} A_\mathrm{p}}{A_\mathrm{s}}\right)^{1/2} mg. \tag{C.20}$$

Definiamo il fattore di riempimento f_A come la frazione della superficie:

$$f_A = \frac{A_\mathrm{p}}{A_\mathrm{s}}. \tag{C.21}$$

Si pensi a f_A come ad una frazione del quadrato occupato dall'aereo nella Figura C.7. Allora

$$\text{forza} = (c_\mathrm{d} f_A)^{1/2}(mg). \tag{C.22}$$

Interessante! La spinta richiesta dall'aereo che viaggia alla velocità ottimale è data dalla moltiplicazione di una costante adimensionale $(c_\mathrm{d} f_A)^{1/2}$ per il peso dell'aereo stesso, indipendentemente dal fluido attraverso cui sta volando. Questa costante, ad ogni buon conto, è conosciuta come rapporto portanza/resistenza dell'aereo. (Ci si riferisce al rapporto portanza/resistenza anche con altri nomi: rapporto di planata efficienza aerodinamica, o finesse; valori tipici sono riportati in tabella C.8).

Considerando i dati del jumbo jet, $c_\mathrm{d} \simeq 0.03$ e $f_A \simeq 0.04$, troviamo che la spinta richiesta è

$$(c_\mathrm{d} f_A)^{1/2}\, mg = 0.036\, mg = 130\,\mathrm{kN}. \tag{C.23}$$

In che modo questo valore è compatibile con i dati di targa del 747? Infatti, ogni motore presenta come massima spinta circa 250 kN, ma questo valore massimo è usato solo in fase di decollo. Durante la crociera, la spinta è molto più piccola: circa 200 kN, ovvero appena il 50% in più del valore stimato dal modello semplificato. I risultati dedotti dal modello risultano inferiori perché le ipotesi sul rapporto portanza/resistenza sono inferiori.

Questa spinta può essere usata direttamente per dedurre l'efficienza del trasporto per ogni aereo. Possiamo individuare due tipi di efficienza del trasporto: il primo tipo è il costo energetico per muovere il *peso*, misurato in kWh per tonnellata-chilometro; il secondo tipo è il costo energetico per muovere le persone misurato in kWh per 100 passeggeri-chilometro.

Efficienza in termini di peso

La spinta è una forza e la forza è definita come energia per unità di distanza. L'energia totale impiegata per unità di distanza è maggiore di un fattore $(1/\epsilon)$, dove ϵ rappresenta l'efficienza del motore che si considererà essere uguale a 1/3.

Ecco allora il costo lordo di trasporto, definito come l'energia per unità di peso, di tutto l'aereo, per unità di distanza:

$$\text{costo di trasporto} = \frac{1}{\epsilon}\frac{\text{forza}}{\text{massa}} \tag{C.24}$$

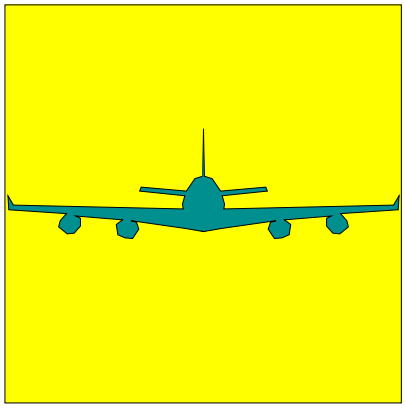


Figura C.7. Vista frontale di un Boeing 747, usata per stimare la superficie frontale A_p dell'aereo. Il quadrato giallo ha una superficie A_s (uguale al valore al quadrato dell'apertura alare).

Airbus A320	17
Boeing 767-200	19
Boeing 747-100	18
Sterna comune	12
Albatros	20

Tabella C.8. rapporti portanza/resistenza.

Figura C.9. Cessna 310N: 60 kWh per 100 passeggero-km. Un Cessna 310 Turbo trasporta sei passeggeri (incluso un pilota) alla velocità di 370 km/h. Fotografia di Adrian Pingstone.

$$= \frac{1}{\epsilon}\frac{(c_\mathrm{d} f_A)^{1/2} mg}{m} \tag{C.25}$$

$$= \frac{(c_\mathrm{d} f_A)^{1/2}}{\epsilon} g. \tag{C.26}$$

In questo modo il costo di trasporto risulta dalla moltiplicazione di un valore adimensionale, relativo alla forma dell'aereo e all'efficienza del suo motore, con g, che è l'accelerazione dovuta alla gravità. Si noti che la formula del costo lordo di trasporto, che è la stessa per tutti i tipi di aeroplano, dipende solo da tre semplici proprietà dello stesso: il suo coefficiente di resistenza, la sua forma e l'efficienza del suo motore. Non dipende affatto dalla sua taglia e tanto meno dal suo peso, né dalla densità dell'aria. Se inseriamo nella formula i valori di $\epsilon = 1/3$ e del rapporto portanza/resistenza uguale a 20, troviamo che, sulla base del nostro modello semplificato, il costo lordo di trasporto per *tutti i tipi* di aeroplano risulta essere

$$0.15\, g$$

ovvero,

$$0.4\,\mathrm{kWh/t\text{-}km}.$$

Quanto possono essere migliorati gli aeroplani?

Se l'efficienza dei motori può essere migliorata soltanto di poco dal progresso tecnologico e se la forma degli aerei è già stata perfezionata per quanto possibile, allora non resta molto da fare per migliorare la quantità adimensionale. L'efficienza di trasporto è vicina al limite fisico ottenibile. La comunità scientifica degli esperti in aerodinamica afferma che si potrebbe ottenere un piccolo miglioramento, da un lato, cambiando la forma degli aeroplani con una fusoliera integrata con le ali [*blended-wing body*, in inglese. (N.d.T.)] e, dall'altro, riducendo il coefficiente di resistenza con il controllo del flusso laminare, una tecnologia che consiste nel poter ridurre la turbolenza sopra l'ala risucchiando un po' di aria attraverso dei piccoli fori sulla superficie (Braslow, 1999). Attraverso l'aggiunta di un controllo del flusso laminare sugli aerei attuali, si potrebbe raggiungere un miglioramento del coefficiente di resistenza del 15%, mentre con una forma della fusoliera integrata alle ali si stima un miglioramento di circa il 18% (Green, 2006). Oltretutto l'equazione C.26 mostra che il costo di trasporto è proporzionale alla radice quadrata del coefficiente di resistenza; in questo modo un miglioramento di c_d del 15% o 18% potrebbe ridurre i costi solo del 7.5% e 9% rispettivamente.

Figura C.10. "Abbottonate i gemelli ai polsini, si parte." Il Bombardier Learjet 60XR disegnato per trasportare otto passeggeri alla velocità di 780 km/h ha un costo di trasporto di 150 kWh per 100 passeggero-km. Fotografia di Adrian Pingstone.

Il costo lordo di trasporto rappresenta il costo energetico per muovere del peso, *incluso il peso dell'aereo stesso*. Al fine di stimare l'energia, espressa per unità di peso delle merci, richiesta per muovere le merci per via aerea, dobbiamo dividere il costo lordo per la frazione di peso associata alle merci stesse. Per esempio, nel caso di un cargo 747 a pieno carico, questo valore

è 1/3 e quindi il costo di trasporto diventa

$$0.45\,g,$$

ovvero circa 1.2 kWh/tonnellata-km. Questo valore è leggermente più elevato del costo di trasporto via camion, che è 1 kWh/t-km.

Efficienza di trasporto per passeggero

In maniera analoga, possiamo stimare l'efficienza di trasporto per passeggero di un 747:

$$\begin{aligned}
&\text{efficienza di trasporto (passeggero–km per litro di carburante)}\\
&= \text{numero di passeggeri} \times \frac{\text{energia per litro}}{\frac{\text{spinta}}{\epsilon}} && \text{(C.27)}\\
&= \text{numero di passeggeri} \times \frac{\epsilon \times \text{energia per litro}}{\text{spinta}} && \text{(C.28)}\\
&= 400 \times \frac{1}{3}\frac{38\,\text{MJ/litro}}{200\,000\,\text{N}} && \text{(C.29)}\\
&= 25\,\text{passeggero–km per litro} && \text{(C.30)}
\end{aligned}$$

Questo valore è leggermente più efficiente di quello di un'auto con un passeggero solo (12 km per litro). In questo modo si dimostra che viaggiare in aereo è più efficiente in termini energetici rispetto che con un auto dove ci sono uno o due passeggeri. L'auto diventa più efficiente se ci sono più di tre passeggeri a bordo.

Punti chiave

Si sono fatti molti conti! Riassumiamone, per convenienza, qui di seguito i punti chiave. Una metà del lavoro fatto da un aereo gli è necessario per *rimanere sospeso in aria*; l'altra metà viene consumata per *continuare ad avanzare*. Alla velocità ottimale, l'efficienza dell'uso del carburante, espressa in energia per unità di distanza percorsa, è stata trovata nella forza (C.22) ed è semplicemente proporzionale al peso dell'aereo. Dunque, mentre se si abbassassero i limiti di velocità delle auto, si ridurrebbe l'energia consumata per unità di distanza percorsa, nel caso degli aerei, invece, questa misura non avrebbe alcun impatto positivo. Gli aeroplani hanno ognuno una propria velocità ottimale che dipende dal loro peso e volando già adottano questa velocità. Se si comandasse ad un aereo di andare più piano, l'energia consumata *salirebbe*. L'unico sistema per far sì che un aeroplano consumi in modo più efficiente è quello di lasciarlo a terra spento. Gli aeroplani sono stati ottimizzati in maniera fantastica e non si hanno indicazioni di significativi miglioramenti nella loro efficienza. (Si vedano p. 42 e p. 146 per un approfondimento sul fatto che i nuovi super jumbo sono "molto più efficienti" di quelli vecchi, p. 41, invece, sul tema motori a turboelica "molto più efficienti" di quelli a reazione.)

Figura C.11. Boeing 737-700: 30 kWh per 100 passeggero-km. Fotografia © Tom Collins.

Distanze raggiungibili senza scalo

Un'altra stima che si può fare è quella della massima distanza raggiungibile da un aereo o da un uccello senza scalo per rifornimento. Si potrebbe pensare che più grande è l'aereo più grande sia la distanza raggiungibile, ma la stima del nostro modello è sorprendentemente semplice. La distanza raggiungibile da un aereo, ovvero la massima distanza in volo prima di rifare il pieno, è direttamente proporzionale alla sua velocità e all'energia contenuta nel carburante, mentre è inversamente proporzionale al ritmo con cui beve il motore:

$$\text{distanza senza scalo} = v_{\text{ottimale}} \frac{\text{energia}}{\text{potenza}} = \frac{\text{energia} \times \epsilon}{\text{forza}}. \tag{C.31}$$

Ora, l'energia contenuta dal carburante è uguale al valore del potere calorifico dello stesso, denominato C e misurato in joule per chilogrammo, moltiplicato per la sua massa. La massa del carburante è a sua volta una frazione $f_{\text{carburante}}$ della massa totale dell'aereo. In questo modo

$$\text{distanza senza scalo} = \frac{\text{energia}\,\epsilon}{\text{forza}} = \frac{Cm\epsilon f_{\text{carburante}}}{(c_{\text{d}} f_A)^{1/2}(mg)} = \frac{\epsilon f_{\text{carburante}}}{(c_{\text{d}} f_A)^{1/2}} \frac{C}{g}. \tag{C.32}$$

È veramente difficile pensare ad un modello più semplice di questo: la distanza raggiungibile da qualsivoglia uccello o aereo risulta essere uguale al prodotto tra un fattore adimensionale $\left(\frac{\epsilon f_{\text{carburante}}}{(c_{\text{d}} f_A)^{1/2}}\right)$, che tiene conto dell'efficienza del motore, del coefficiente di resistenza e della geometria del volatile, ed una distanza, che definiamo fondamentale,

$$\frac{C}{g},$$

che è legata, solo e solamente, alla proprietà del carburante ed alla gravità. Non c'è infatti alcun legame con la taglia, la massa, la lunghezza o la larghezza del volatile, né tanto meno alcuna dipendenza dalla densità del fluido.

Allora qual è questa magica distanza? Questa è la stessa qualunque sia il carburante, sia esso grasso d'oca o benzina per aviazione: entrambi sono essenzialmente degli idrocarburi del tipo $(CH_2)_n$. La benzina per aviazione ha un potere calorifico di $C = 40\,\text{MJ}$ per kg. La distanza associata a tale carburante è

$$d_{\text{Carburante}} = \frac{C}{g} = 4000\,\text{km}. \tag{C.33}$$

La distanza massima percorribile da un uccello è data dalla distanza intrinsecamente legata al carburante, ovvero 4000 km, moltiplicata per un fattore $\left(\frac{\epsilon f_{\text{carburante}}}{(c_{\text{d}} f_A)^{1/2}}\right)$. Pertanto, se il nostro uccello presenta un'efficienza del motore pari a $\epsilon = 1/3$, un rapporto portanza/resistenza $(c_{\text{d}} f_A)^{1/2} \simeq 1/20$, e circa metà del suo peso è costituito da quello del carburante (si tenga

Si può pensare a $d_{\text{Carburante}}$ come alla distanza che il carburante potrebbe percorrere se convertisse tutta la sua energia chimica in energia cinetica, seguendo una traiettoria parabolica senza resistenza dell'aria [ad esser precisi, in questo caso, la distanza raggiunta attraverso una traiettoria parabolica sarebbe due volte C/g. (N.d.A.)]. Questa distanza è anche l'altezza *verticale* che il carburante potrebbe raggiungere con un lancio se non ci fosse la resistenza dell'aria. Un'altra cosa buffa da notare è che il potere calorifico del carburante C, che è stato dato in joule per chilogrammo, dipende dal quadrato della velocità: 40×10^6 J per kg sono $(6000\,\text{m/s})^2$ (proprio come nella formula di Einstein $E = mc^2$, dove il rapporto energia/massa, E/m, è proporzionale alla velocità della luce al quadrato c^2). Così, un modo per pensare al grasso diventa "il grasso è 6000 metri al secondo". Dunque, qualora si volesse perdere peso correndo, la velocità di 6000 m/s (21600 km/h) è quella a cui si dovrebbe puntare, nel caso in cui lo si volesse perdere tutto in un colpo.

conto che in un 747 a pieno carico il 46% del peso è rappresentato dal carburante), si ha che tutti gli uccelli o gli aerei, di qualunque dimensione essi siano, hanno la stessa autonomia senza scalo: circa tre volte la distanza del carburante, ovvero 13000 km.

Questa stima, ancora una volta, è vicina alla realtà: il volo record non-stop di un 747, stabilito il 23–24 marzo del 1989, fu una distanza di 16560 km.

L'affermazione, poi, che la distanza raggiungibile senza scalo sia indipendente dalla taglia del volatile viene supportata dalle osservazioni sul campo, che vedono uccelli di ogni taglia, dalle grandi oche alle minute rondini e sterne codalunga, migrare per distanze intercontinentali. Il volo più lungo non-stop di un uccello, che è stato possibile misurare, fu di 11000 km e fu stabilito da una pittima minore.

Quanto si spinse lontano Steve Fossett con il Virgin Atlantic GlobalFlyer Model311 progettato da Scaled Composites? 41467 km [33ptcg]. Un aereo un po' particolare: al decollo l'83% del suo peso era carburante; in volo fece attenzione a sfruttare le correnti ad alta quota per aumentare la distanza percorsa. Tuttavia, l'aereo, a causa della sua fragilità, incontrò molti problemi durante il volo.

Il modello semplificato ci porta anche a riflettere su un punto interessante: se ci chiedessimo "quale sia la densità dell'aria ottimale per volare", troveremo che la *spinta* richiesta (C.20) alla velocità ottimale è indipendente dalla densità. In questo modo, secondo il nostro modello semplificato, il nostro aereo sarebbe felice di volare a qualsiasi altezza. Non ci sarebbe una densità ottimale. L'aereo presenterebbe lo stesso consumo in chilometri al litro per ogni densità. In realtà, la *velocità* ottimale dipende dalla densità ($v^2 \sim 1/\rho$, equazione C.16). In questo modo, se tutti gli altri parametri non vengono variati, il modello semplificato dell'aereo indicherebbe che il tempo di viaggio più breve sarebbe quello che avviene negli strati di aria con il valore più basso di densità. Nella realtà, l'efficienza dei motori non è indipendente dalla velocità né dalla densità dell'aria. Il nostro modello semplificato ci dice che quando l'aereo diminuisce il suo peso bruciando carburante, la sua velocità ottimale per una data densità si riduce di ($v^2 \sim mg/(\rho(c_\mathrm{d}A_\mathrm{p}A_\mathrm{s})^{1/2})$). In questa maniera, un aereo che voli in uno strato di aria a densità costante, dovrebbe ridurre la sua velocità, dato che si sta alleggerendo. Oppure, un aereo può continuare ad andare ad una *velocità costante* mantenendo, così, la sua velocità *ottimale*, basta che aumenti la sua altitudine in maniera da incontrare una densità dell'aria minore. La prossima volta che chi legge si troverà su di un volo a lunga distanza, potrà verificare direttamente che il pilota incrementerà l'altezza di crociera del volo passando, diciamo, dai 9500 metri tenuti all'inizio ai 12000 metri verso la fine.

Un aeroplano ad idrogeno come si comporterebbe?

Abbiamo già visto che l'efficienza del volo, in termini di energia per t-km, è uguale al semplice prodotto di un numero adimensionale con g. Pertanto, se si cambiasse il carburante non si sposterebbe di molto il risultato di questo prodotto. Discutere di aerei ad idrogeno avrebbe senso solo se ci fosse la speranza di ridurre l'impatto sul clima dovuto alle emissioni. Potrebbero anche presentare una maggiore autonomia di crociera senza scalo; ma ci si illuderebbe se ci si aspettasse che siano radicalmente più efficienti nel consumo di energia.

Possibili campi di miglioramento dell'efficienza di un aereo

Il volo in formazione, come fanno le oche, potrebbe portare ad un aumento dell'efficienza nel consumo di carburante dell'ordine del 10%. Questo perché il rapporto portanza/resistenza risulta essere maggiore rispetto a quello di un singolo aeromobile. Naturalmente, però, questo accorgimento funziona bene per le oche che vogliono migrare tutte assieme verso la stessa destinazione e nello stesso momento.

Ottimizzazione della lunghezza delle tratte aeree: gli aerei a lungo raggio, progettati in genere per coprire distanze di circa 15000 km, non sono efficienti nel consumo di carburante tanto quanto quelli a corto raggio, perché devono trasportare più carburante e quindi hanno meno spazio per i passeggeri e le merci. Sarebbe energeticamente più efficiente viaggiare spezzando il volo in tratte più brevi con aerei a corto raggio. Tratte di 5000 km sono quelle che si dovrebbero scegliere, suddividendo così i viaggi di lunga distanza in due o tre tappe intermedie dove rifare rifornimento di carburante (Green, 2006). Voli di lunga distanza suddivisi in tratte più corte potrebbero essere più efficienti di circa il 15%; chiaramente però si introdurrebbero altri costi.

Aeroplani amici dell'ambiente

Qualche volta succede di sentire parlare di persone intente a costruire aerei amici dell'ambiente. Nella prima parte di questo capitolo, però, il nostro modello semplificato ha concluso che il costo di trasporto di *ogni* aeroplano è circa

$$0.4\,\mathrm{kWh/t\text{-}km}.$$

Secondo questo modello, quindi, i soli modi in cui un aereo potrebbe migliorare significativamente questo valore sarebbero quello di ridurre la resistenza dell'aria (magari inserendo sull'ala dei piccoli fori collegati ad una sorta di aspirapolvere progettato apposta), oppure quello di cambiare la forma geometrica dell'aereo, facendolo assomigliare sempre più ad un deltaplano con le ali molto estese rispetto alla fusoliera o addirittura senza fusoliera ma solo con un'unica grande ala.

Allora, diamo un'occhiata alle notizie più recenti riguardanti l'"aviazione amica dell'ambiente" e verifichiamo se davvero uno di questi aerei può migliorare il valore di riferimento di 0.4 kWh per t-km. Se un aereo consumasse meno di 0.4 kWh per t-km, dovremmo concludere che il modello semplificato non descrive le cose come stanno.

Il modello Electra, un aereo monoposto di legno e tessuto, ha volato per 48 minuti percorrendo 50 km nella zona a sud delle Alpi [6r32hf]. Questo apparecchio presenta un'apertura alare di 9 metri e come propulsore ha un motore elettrico di 18 kW di potenza alimentato da 48 kg di batterie al litio. Il suo peso al decollo è 265 kg (134 kg dell'aereo, 47 kg delle batterie e 84 kg del pilota). Il 23 dicembre 2007 ha volato per una distanza di 50 km. Se si ipotizza che la densità di energia delle batterie sia stata di 130 Wh/kg e che il volo abbia consumato il 90% della carica (5.5 kWh), allora il costo di trasporto è stato di circa

$$0.4\,\text{kWh/t-km}$$

che è esattamente il valore previsto dal nostro modello semplificato. Questo aereo elettrico non consuma meno energia di quelli a carburante fossile.

Chiaramente, questo non vuol dire che gli aerei elettrici non siano interessanti. Il fatto di avere una tecnologia che possa rimpiazzare gli aerei tradizionali con alternative che consumano dal punto di vista energetico uguale ma non producono emissioni di carbonio, sarebbe certamente un fatto utile. Inoltre, come trasportatore di persone, Electra presenta un più che degno consumo di 11 kWh per 100 p-km, che è simile a quello presentato nel grafico dei trasporti a p. 141 per quanto riguarda l'auto elettrica. Ma in questo libro, la domanda di fondo è sempre la stessa: "da dove viene l'energia?".

Figura C.12. Il modello Electra F-WMDJ: 11 kWh per 100 p-km. Foto di Jean–Bernard Gache. www.apame.eu

Molte barche si comportano come volatili

Un po' di tempo dopo aver messo giù il modello semplificato del volo, ho capito che può descrivere, non solo i volatili nell'aria, ma anche gli aliscafi e ogni altro tipo di imbarcazione ad alta velocità. Insomma tutti quelli che si muovono a filo d'acqua quando si spostano.

La Figura C.13 mostra il principio su cui si basa l'aliscafo. Il peso dell'imbarcazione è sostenuto da un'ala, inclinata sotto il livello dell'acqua, che può essere molto più piccola rispetto all'imbarcazione stessa. L'ala genera portanza spingendo l'acqua verso il basso, proprio come nel caso dell'aereo riportato in figura C.2. Se ipotizziamo che la resistenza è dovuta principalmente a quella sull'ala e che i valori delle dimensioni dell'ala e della velocità dello scafo sono stati ottimizzati per diminuire l'energia spesa per unità di distanza, allora il migliore costo possibile di trasporto, definito come energia per tonnellata-chilometro, sarà esattamente uguale a quello riportato in C.26:

$$\frac{(c_\mathrm{d} f_A)^{1/2}}{\epsilon} g, \tag{C.34}$$

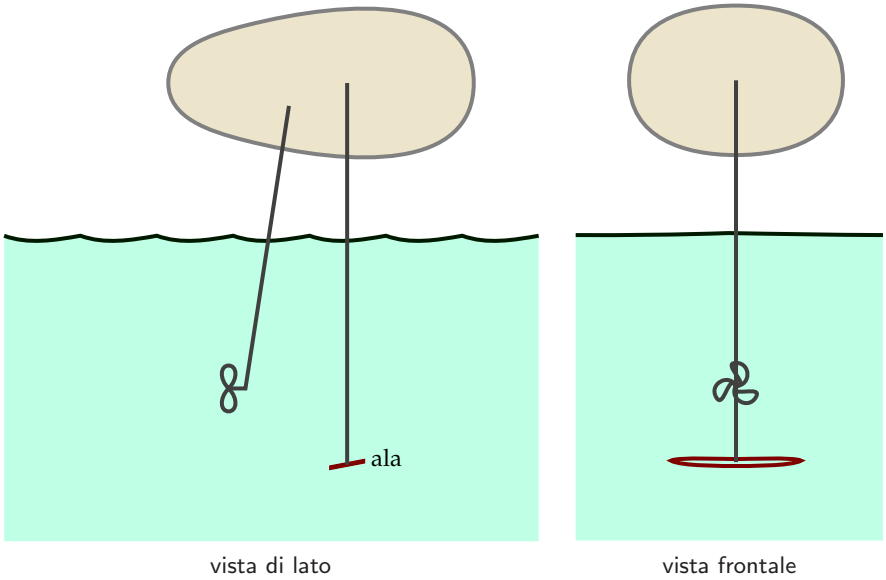


Figura C.13. Aliscafo.
Fotografia di Georgios Pazios.

dove c_d è il coefficiente di resistenza dell'ala sotto l'acqua, f_A è il valore adimensionale che calcola il rapporto tra le superfici così come definito in precedenza, ϵ è l'efficienza del motore e g è l'accelerazione dovuta alla gravità.

Forse i valori di c_d e f_A non sono propri gli stessi di un aereo ottimizzato. In ogni caso, il punto importante di questa teoria è che non esiste nessuna dipendenza dalla densità del fluido attraverso cui l'ala sta passando. In questa maniera, la nostra previsione spannometrica è che il costo di trasporto di un aliscafo è *lo stesso* di quello di un aereo! Se tale costo viene definito come energia per unità di distanza e peso, compreso quello del veicolo, vale a dire circa 0.4 kWh per t-km.

Per gli scafi che fanno il filo alla superficie dell'acqua, come ad esempio i catamarani ad alta velocità o gli sciatori d'acqua, un modello più accurato dovrebbe tenere in conto anche dell'energia che si converte nelle onde; tuttavia, penso che questo modello di descrizione degli aliscafi rimanga fondamentalmente buono per il nostro studio.

Non ho trovato dei dati sul costo del trasporto di un aliscafo, ma guardando quelli di un catamarano atto al trasporto delle persone e che viaggia alla velocità di 41 km/h, sembrano parecchio in linea con le previsioni: il consumo è circa 1 kWh per t-km.

È una grande sorpresa, almeno per me, aver imparato che un collegamento tra isole effettuato con un aereo non solo è più veloce di quello con nave, ma consuma anche, molto probabilmente, meno energia.

Altri metodi per rimanere in aria

Dirigibili

Nel corso di questo capitolo si è insistito molto sul fatto che non ci si possa aspettare più di tanto un miglioramento dell'efficienza energetica degli aerei facendoli viaggiare più lentamente, perché ogni beneficio ricavato dalla ridotta resistenza dell'aria viene più che cancellato dalla necessità di spingere verso il basso l'aria. Questo problema si può forse pensare di risolverlo compiendo una scelta tecnica diversa: non più spingendo l'aria verso il basso ma essendo tanto leggeri quanto l'aria. Un dirigibile, anche chiamato aerostato o nave aerea, usa un enorme pallone ripieno di elio, che è un gas più leggero dell'aria, per controbilanciare il peso della sua piccola cabina. Il grosso svantaggio di questa scelta è che il grosso pallone aumenta molto la resistenza del veicolo all'aria.

I modi per tenere basso il costo energetico di un dirigibile, sia esso per unità di peso che di distanza, sono quelli di muoverlo lentamente, di avere una forma come quella di un pesce e di essere molto largo e lungo. Costruiamoci, allora, un modello semplificato per calcolare l'energia richiesta da un dirigibile ideale per muoversi.

Si assuma che il pallone sia di forma ellissoidale con una sezione di superficie A e una lunghezza L. Il volume del pallone è, quindi, $V = \frac{2}{3}AL$. Se l'aerostato galleggia stabilmente nell'aria di densità ρ, la sua massa totale, incluso il suo carico e l'elio, deve essere $m_{\text{totale}} = \rho V$. Se si muove alla velocità v, la forza della resistenza dell'aria è data da

$$F = \frac{1}{2} c_{\text{d}} A \rho v^2, \tag{C.35}$$

dove c_{d} è il coefficiente di resistenza, il cui valore, per quanto visto con gli aeroplani, ci aspetteremo sia circa 0.03. L'energia spesa per unità di distanza, è uguale a F diviso per l'efficienza ϵ dei motori. In questa maniera, il costo lordo del trasporto – ovvero, l'energia impiegata per unità di distanza per unità di massa – diventa

$$\frac{F}{\epsilon m_{\text{totale}}} = \frac{\frac{1}{2} c_{\text{d}} A \rho v^2}{\epsilon \rho \frac{2}{3} A L} \tag{C.36}$$

$$= \frac{3}{4\epsilon} c_{\text{d}} \frac{v^2}{L}. \tag{C.37}$$

Questo è proprio un bel risultato! Il costo lordo di trasporto di un dirigibile ideale dipende solamente dalla sua velocità v e dalla sua lunghezza L e non dalla densità dell'aria ρ e neanche dalla sua superficie frontale A.

Questo modello semplificato si può utilizzare senza nessuna modifica anche nel caso di un sottomarino. Il costo lordo di trasporto di un aerostato, espresso in kWh per t-km, è esattamente uguale a quello di un sottomarino che abbia la stessa lunghezza e che viaggi alla stessa velocità.

Figura C.14. Il dirigibile USS Akron(ZRS-4) lungo 239 m mentre sorvola Manhattan. Il suo peso era di 100 t e poteva portare 83 t. I suoi motori avevano una potenza totale di 3.4 MW, e l'apparecchio poteva trasportare 89 soldati con relative munizioni alla velocità di 93 km/h. Fu anche utilizzato come mezzo di trasporto delle merci.

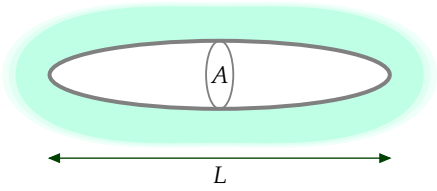


Figura C.15. Un dirigibile ellissoidale.

Il sottomarino, per contro, costa in termini assoluti mille volte di più per essere mosso, dato che deve possedere una massa mille molte maggiore avendo a che fare con l'acqua, che è mille volte più densa dell'aria. La sola differenza tra i due, a favore del dirigibile, sono gli eventuali ricavi dalle scritte pubblicitarie sulle fiancate.

Proviamo ora a buttare dentro qualche numero. Ipotizziamo che la velocità di crociera desiderata sia 80 km/h in maniera che l'attraversamento dell'Oceano Atlantico richieda tre giorni. Nelle unità di misura del Sistema Internazionale, SI, questa velocità equivale a 22 m/s. Ipotizziamo, inoltre, un'efficienza ϵ di 1/4. Qual è la massima lunghezza del dirigibile che possiamo immaginare per ottenere il miglior costo possibile di trasporto? Il dirigibile Hindenburg era lungo 245 m. Se prendiamo $L = 400\,\mathrm{m}$, allora troviamo che il costo di trasporto risulta essere:

$$\frac{F}{\epsilon m_{\text{totale}}} = 3 \times 0.03 \frac{(22\,\mathrm{m/s})^2}{400\,\mathrm{m}} = 0.1\,\mathrm{m/s^2} = 0.03\,\mathrm{kWh/t\text{-}km}.$$

Se il carico trasportato fosse la metà della massa totale dell'aerostato, il costo di trasporto netto per le merci di questo mostro dei cieli sarebbe uguale a 0.06 kWh/t-km – vale a dire simile a quello su rotaia.

Ekranoplani

Un ekranoplano, detto anche schermoplano, è un aeroplano ad effetto suolo, ovvero un aereo che vola su una superficie di acqua ottenendo la portanza non dalla spinta verso il basso dell'aria, come un aereo, o dell'acqua, come nel caso dell'aliscafo e dell'idrovolante, ma dal cuscino d'aria compressa che si crea tra le sue ali e la superficie sottostante. L'effetto suolo è quello che permette ad una carta da gioco lanciata lungo un tavolo piatto di scivolare per un lungo tratto. Dal momento che riuscire a mantenere questo cuscino richiede molta poca energia, un aeroplano ad effetto suolo, in termini energetici, è molto simile ad un veicolo di superficie che non incontra nessun attrito di rotolamento. Si ricordi che per un aereo che vola alla velocità ottimale, metà dell'energia consumata è associata alla resistenza dell'aria mentre l'altra metà è necessaria per spingere giù l'aria.

L'Unione Sovietica sviluppò l'ekranoplano come mezzo di trasporto militare e lancia missili durante l'era Krusciov. L'Ekranoplano Lun poteva viaggiare alla velocità di 500 km/h e la spinta totale fornita dai suoi otto motori era di 1000 kN, sebbene questo valore non fosse necessario un volta che la struttura si fosse sollevata sopra l'acqua. Se si ipotizza che la spinta di crociera fosse stata un quarto di quella massima, che i motori fossero stati efficienti al 30% e che, del peso totale di 400 tonnellate, 100 fossero il carico trasportato, allora il costo netto per il trasporto di merci di questo veicolo era di 2 kWh per t-km. Ritengo che l'ekranoplano, una volta migliorato per il trasporto delle merci non militari, potrebbe avere un costo di trasporto delle merci pari a circa la metà di quello di un aereo normale.

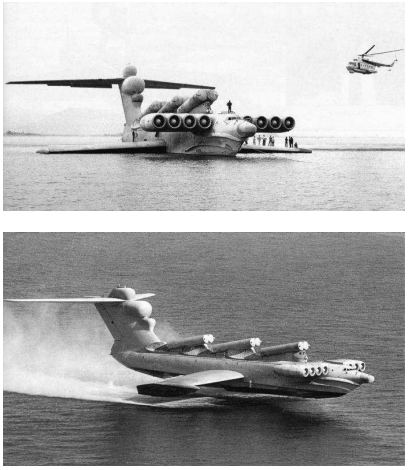


Figura C.16. L'ekranoplano Lun – leggermente più lungo e pesante di un Boeing 747. Fotografie di A. Belyaev.

False credenze

L'aereo sarebbe decollato in ogni caso, in questo modo il mio volo non è costato niente dal punto di vista energetico.

Questo ragionamento è falso per due ragioni. La prima è che su un aereo ogni peso in più richiede dell'energia supplementare per farlo rimanere in aria. La seconda è che le compagnie aeree rispondono alla domanda del mercato facendo volare più aerei se questa non accenna a diminuire.

Note ed approfondimenti

p.

303 I coefficienti di resistenza di un *Boeing 747* si possono trovare su `www.aerospaceweb.org`. Altri dati possono essere recuperati da [`2af5gw`]. I dati relativi agli albatros sono disponibili su [`32judd`].

– *I motori a turbina presentano un'efficienza reale di circa $\epsilon = 1/3$.* Le efficienze tipiche di un motore sono comprese tra 23% e 36% [`adg.stanford.edu/aa241/propulsion/sfc.html`]. Per un aereomobile, mediamente, l'efficienza totale del motore varia tra 20% e 40%; nel caso in cui si utilizzino i migliori motori a reazione a turbo ventola si arriva ad un 30–37% [`www.grida.no/climate/ipcc/aviation/097.htm`]. Si noti bene che non si può scegliere semplicemente il motore più efficiente dal momento che potrebbe essere più pesante, ovvero potrebbe avere una massa più grande per unità di spinta, riducendo in questo modo l'efficienza totale dell'aereo.

309 *Il volo più lungo non-stop di un uccello...*
New Scientist 2492. "Bar-tailed godwit is king of the skies." ["La pittima minore è il re dei cieli." (N.d.T.)]. 26 marzo 2005.
11 settembre 2007: Una pittima minore vola 11500 km non-stop dall'Alaska alla Nuova Zelanda. [`2qbquv`]

310 *Ottimizzazione della lunghezza delle tratte aeree: la distanza ottimale risulta essere circa 5000 km*. Fonte: Green (2006).

312 *Dati relativi ad un catamarano per trasporto delle persone.* Secondo [`5h6xph`], il peso spostato a pieno carico è di 26.3 tonnellate. Lungo un viaggio di 1050 miglia nautiche il consumo è stato di 4780 litri di carburante. Mi pare che sia possibile stimare un costo di trasporto per unità di peso di 0.93 kWh per t-km. In questo caso è il peso totale del natante quello considerato. Per la stessa imbarcazione l'efficienza del trasporto per *passeggero* è circa 35 kWh per 100 p-km.

314 *L'ekranoplano Lun.* Fonti: `www.fas.org` [`4p3yco`], (Taylor, 2002a).

Maggiori informazioni in: Tennekes (1997), Shyy et al. (1999).

D Solare II

Figura D.1. Due alberi.

Nella prima parte a p. 48 abbiamo elencato quattro modalità per estrarre energia dalle biomasse che hanno immagazzinato l'energia solare:

1. "Sostituti del carbone".
2. "Sostituti del petrolio".
3. Cibo per alimentazione umana e animale.
4. Incenerimento di scarti da agricoltura.

Nei prossimi paragrafi stimeremo il contributo massimo plausibile per ognuno di questi processi. Nella pratica, molti di questi metodi richiedono così tanta energia *in ingresso* per essere messi in campo che raramente risultano essere dei contributori netti di energia (si veda figura 6.14). Nella nostra trattazione, però, i costi energetici associati a questa necessità saranno ignorati in maniera deliberata.

Coltivazioni ad alto contenuto energetico come sostituti del carbone

Se in Gran Bretagna coltivassimo piante ad alto contenuto energetico quali, ad esempio, il salice, il miscanto o il pioppo, che presentano una potenza media per metro quadrato di terra pari a 0.5 W, e le buttassimo in pasto ad una centrale elettrica termica con un'efficienza del 40%, la potenza per unità di superficie sarebbe di $0.2\,\mathrm{W/m^2}$. Se un ottavo della superficie della Gran Bretagna (ovvero $500\,\mathrm{m^2}$ per persona) fosse coperto da queste coltivazioni, la potenza finale disponibile sarebbe di 2.5 kWh/gg per persona.

Figura D.2. La colza. Se usata per produrre il biodiesel, la potenza per unità di superficie della colza è $0.13\,\mathrm{W/m^2}$. Foto di Tim Dunne.

Sostituti del petrolio

Esistono varie modalità con cui convertire le piante in carburanti liquidi. Per ognuna di queste, nel seguito, si riporterà il potenziale in termini di potenza per unità di superficie, come già fatto in figura 6.11.

La colza: la più grande coltivazione britannica per biodiesel

La colza viene seminata tipicamente a settembre e mietuta il mese di agosto seguente. Attualmente 450 000 ettari di campi sono coltivati a colza ogni anno nel Regno Unito. (Questo dato corrisponde al 2% dell'intera superficie.) I campi di colza producono 1200 litri di biodiesel per ettaro all'anno. Il biodiesel possiede un'energia di 9.8 kWh per litro. In questo modo, la potenza per unità di superficie è $0.13\,\mathrm{W/m^2}$.

Se usassimo il 25% della Gran Bretagna per la coltivazione della colza, otterremmo biodiesel con un contenuto di energia di 3.1 kWh/gg per persona.

Dalla barbabietola da zucchero all'etanolo

Nel Regno Unito, la barbabietola da zucchero permette un impressionante raccolto di 53 tonnellate per ettaro all'anno. Per produrre 108 litri di bioetanolo ci vuole una tonnellata di barbabietole da zucchero. Dal momento che il bioetanolo ha una densità di energia di 6 kWh per litro, questo processo presenta un potenza per unità di superficie di 0.4 W/m^2, sempre se non si tiene conto dell'energia richiesta per farlo funzionare.

Bioetanolo dalla canna da zucchero

Nei Paesi, come ad esempio il Brasile, dove si può coltivare la canna da zucchero, il raccolto è di 80 tonnellate per ettaro all'anno e con questo si producono circa 6500 litri di etanolo. Dal momento che il bioetanolo presenta una densità energetica di 6 kWh per litro, questo processo presenta una potenza per unità di superficie di 0.5 W/m^2.

Bioetanolo dal mais negli Stati Uniti

La potenza per unità di superficie è sorprendentemente bassa. Per puro gusto del divertimento, riportiamo, come prima cosa, i numeri nelle unità di misura arcaiche. 1 acro produce 122 moggi di mais all'anno, da cui si possono ottenere 122 $\times$ 2.6 galloni americani di etanolo, i quali, a loro volta, con 84 000 BTU per gallone corrispondono ad una potenza per unità di superficie di 0.2 W/m^2. Tuttavia, l'energia richiesta in *ingresso* per far funzionare il processo di trasformazione dal mais all'etanolo ammonta a 83 000 BTU per gallone e, in questa maniera, il 99% dell'energia prodotta viene usata nella trasformazione, facendo si che la potenza *netta* per unità di superficie sia circa 0.002 W/m^2. L'unico modo per avere una significativa potenza dal processo di trasformazione del mais in etanolo è quello di assicurarsi che tutti i sottoprodotti generati durante il processo siano utilizzati; includendo, allora, anche l'energia contenuta in questi, la potenza netta per unità di superficie diventa circa 0.05 W/m^2.

Bioetanolo cellulosico dalla pianta di panico verga

Il bioetanolo cellulosico sarà, forse, la meravigliosa "prossima generazione" di biocarburante? Schmer et al. (2008) hanno trovato che l'energia netta prodotta dalle piante di panico verga cresciute in terreni agricoli marginali di 10 fattorie nella zona centrale degli Stati Uniti è di 60 GJ per ettaro all'anno, il che corrisponde a 0.2 W/m^2. Gli autori dello studio riportano che

	densità energetica (kWh/kg)
legno dolce	
– seccato all'aperto	4.4
– seccato al forno	5.5
legno duro	
– seccato all'aperto	3.75
– seccato al forno	5.0
carta bianca da ufficio	4.0
carta lucida	4.1
giornali	4.9
cartone	4.5
carbone	8
paglia	4.2
lettiera avicola	2.4
rifiuti industriali	4.4
rifiuti ospedalieri	3.9
rifiuti solidi urbani	2.6
residuo secco combustibile	5.1
pneumatici	8.9

Tabella D.3. Potere calorifico del legno e simili. Fonti: Yaros (1997); Ucuncu (1993), Digest of UK Energy Statistics 2005.

"questo risultato è frutto del materiale genetico e delle tecniche agronomiche disponibili negli anni 2000 e 2001, quando i campi furono piantati. Un miglioramento nelle tecniche genetiche e agronomiche potrebbe aumentare la sostenibilità energetica e la produzione di biocarburante da panico verga".

Anche la pianta di jatropha presenta una bassa potenza per unità di superficie

La *jatropha* è una pianta oleaginosa che cresce molto bene nelle regioni tropicali secche (caratterizzate da 300–1000 mm di pioggia all'anno). Le piacciono, infatti, le temperature comprese tra i 20 e i 28 °C. Sui terreni fertili dei Paesi caldi, la stima di produzione è di 1600 litri di biodiesel per ettaro all'anno. Questo significa che la potenza per unità di superficie è uguale a 0.18 W/m^2. Su terreni meno fertili, la produzione si riduce a 583 litri per ettaro all'anno, ovvero 0.065 W/m^2.

Se si stabilisse di utilizzare il 10% della superficie dell'Africa per generare 0.065 W/m^2 e di spartire questa potenza tra sei miliardi di persone, che cosa ne avremmo tutti? 0.8 kWh/gg/persona. A titolo di paragone, la produzione mondiale di petrolio ammonta a 80 milioni di barili al giorno, il che significa 23 kWh/gg/persona una volta condivisa tra sei miliardi di persone. In questa maniera, anche se *tutta* l'Africa venisse coperta da piantagioni di *jatropha*, la potenza prodotta coprirebbe solo un terzo del consumo mondiale di petrolio.

E le alghe?

Le alghe sono delle piante, di conseguenza tutto ciò che è stato precedentemente detto su queste ultime vale anche per loro. Queste viscide piante acquatiche non sono più efficienti nel processo di fotosintesi delle loro cugine terrestri. Esiste, però, un trucchetto, che, per chi si occupa della trasformazione delle alghe in biodiesel, è pratica comune: le loro alghe crescono in un'acqua fortemente arricchita di anidride carbonica e quest'ultima potrebbe essere raccolta come prodotto di scarto delle centrali termiche o di altre industrie. Il processo di fotosintesi richiede molto meno sforzi da parte delle piante se l'anidride carbonica gli viene fornita in forma concentrata. Ron Putt della Auburn University afferma che in una località degli Stati Uniti piena di sole e in pozze di acqua alimentate con CO_2 (concentrazione fino al 10%) le alghe possono crescere al ritmo di 30 g per metro quadro al giorno, producendo, così, 0.01 litri di biodiesel per metro quadro al giorno. Questo risultato corrisponde ad una potenza per unità di superficie della pozza di 4 W/m^2 – simile al campo solare in Baviera. Se si volesse guidare un'auto con consumi nella media (12 km per litro) per 50 km al giorno, allora sarebbero necessari 420 metri quadrati di piscina con alghe per alimentare solo quell'auto. Come termine di parago-

ne, la superficie per abitante nel Regno Unito è di 4000 metri quadrati, dei quali 69 m^2 sono coperti da acqua (figura 6.8). Attenzione a non dimenticare che l'anidride carbonica deve essere continuamente pompata dentro alle piscine. In questo modo, questa tecnologia sarebbe limitata, da un lato, dalla superficie occupabile – cioè quella che dovrebbe essere convertita per ospitare le pozze con le alghe – e, dall'altro, dalla disponibilità di CO_2 concentrata, la cui raccolta avrebbe un costo energetico (questo argomento è trattato nei Capitoli 23 e 31). Controlliamo i limiti imposti dal fatto di dover usare la CO_2 concentrata. La crescita di 30 g di alghe per m^2 al giorno richiederebbe almeno 60 g di CO_2 per m^2 al giorno (questo perché la molecola di CO_2 ha maggiore massa per atomo di carbonio rispetto alle molecole presenti in un alga). Se tutta la CO_2 prodotta da tutte le centrali del Regno Unito venisse catturata (ossia all'incirca due tonnellate e mezza all'anno per persona), questa potrebbe servire 100 metri quadrati per persona di piscine con le alghe descritte sopra – ovvero una copertura di circa il 3% del Paese. Questa superficie produrrebbe biodiesel con una potenza di 24 kWh per persona al giorno, sempre che i numeri riportati sopra e basati su misure effettuate negli assolati Stati Uniti si possano utilizzare per la Gran Bretagna. Tutto ciò è una visione plausibile? Forse sarebbe possibile solo un decimo di questo? Lascio a chi legge decidere.

E le alghe nel mare, allora?

Si ricordi cosa è stato appena affermato nel paragrafo precedente: la banda dei produttori di biodiesel da alghe nutre sempre le proprie alghe con "concentrato di CO_2". Se si sceglierà di spostarsi in mare aperto, presumibilmente pompare CO_2 non sarà più un'opzione praticabile, e la produttività della alghe scende di 100 volte senza la CO_2 concentrata. Per fare la differenza con le alghe nel mare sarebbe richiesta una superficie di raccolta della taglia di una nazione.

E le alghe che producono idrogeno?

Provare a produrre idrogeno dalla melma posta sotto il sole è un'idea intelligente, perché toglie di mezzo parecchi passaggi chimici normalmente seguiti dalle piante che producono carboidrati. Ogni trasformazione chimica riduce di un po' l'efficienza. L'idrogeno può essere prodotto direttamente dal sistema fotosintetico nel corso della prima trasformazione. Un recente studio, frutto di una ricerca del National Renewable Energy Laboratory [Laboratorio Nazionale per le Energie Rinnovabili. (N.d.T.)] in Colorado, prevede che un reattore, che copre un'area di 11 ettari nel deserto dell'Arizona ed è riempito con alghe verdi geneticamente modificate, sia in grado di produrre 300 kg di idrogeno al giorno. Pertanto, un impianto del genere dovrebbe produrre una potenza per unità di superficie di 4.4 W/m^2, dal momento che l'idrogeno possiede un contenuto energetico di 39 kWh

per kg. Se si tenesse in conto la stima dell'elettricità richiesta per farlo funzionare, allora, la potenza netta prodotta sarebbe ridotta a 3.6 W/m^2. Questo valore, secondo me, è un dato molto promettente – se confrontato, ad esempio, con quello del campo solare in Baviera (5 W/m^2).

Cibo per esseri umani o altri animali

I semi delle colture come quelle di grano, avena, orzo e mais presentano una densità energetica di circa 4 kWh per kg. Nel Regno Unito, mediamente, la resa della coltivazione del grano è di 7.7 tonnellate per ettaro all'anno. Se il grano viene mangiato da un animale, la potenza per unità di superficie di questo processo è di 0.34 W/m^2. Se una superficie di 2800 m^2 per abitante della Gran Bretagna (ovvero quella parte che corrisponde al suolo agricolo), fosse interamente dedicata alla coltivazione delle colture di cui sopra, l'energia chimica generata sarebbe di circa 24 kWh/gg per persona.

Incenerimento degli scarti agricoli

Nei paragrafi precedenti abbiamo trovato che la potenza per unità di superficie di una centrale a biomassa che bruci la migliore coltura per contenuto energetico è 0.2 W/m^2. Se, invece, coltivassimo la terra solo per produrre il cibo ed alimentassimo con gli scarti che non mangiamo una centrale termica – o se questi li dessimo in pasto alle galline ed utilizzassimo le loro deiezioni per alimentare la stessa centrale termica –, quale potenza per unità di superficie del suolo agricolo potrebbe essere prodotta? Proviamo a fare delle stime grossolane e poi diamo un'occhiata a dei valori reali. Ipotizziamo che gli scarti provengano da metà della superficie della Gran Bretagna (2000 m^2 per persona), che siano trasportati alle centrali termiche elettriche e, infine, che siano capaci di produrre almeno il 10% di potenza per unità di superficie di quella prodotta dalla migliore coltura: 0.02 W/m^2. Moltiplicando questo valore per 2000 m^2 otteniamo 1 kWh al giorno per persona.

Quanto mi sono allontanato dalla realtà nell'immaginare questi valori riferiti agli scarti agricoli? Possiamo, in maniera più plausibile, ritentare la stima della produzione di energia da scarti agricoli facendo delle proiezioni su scala nazionale basate sui dati della centrale termoelettrica a paglia di Elean nella regione della East Anglia. Questa centrale genera una potenza di 36 MW e brucia 200 000 t all'anno di scarti agricoli provenienti da un'area attorno di 80 chilometri di raggio. Se supponiamo che questa densità possa essere replicata per l'intero Regno Unito, allora, il modello di Elean offre 0.002 W/m^2. Dato che si hanno a disposizione 4000 m^2 a persona, questo significa 8 W per persona, ossia 0.2 kWh/gg per persona.

Proviamo a fare i conti in un'altra maniera ancora.

Nel Regno Unito la produzione di paglia si attesta sui 10 milioni di tonnellate all'anno, che equivale a 0.46 kg al giorno per persona. Con una

densità di energia di 4.2 kWh al kg, la paglia ha un'energia chimica di 2 kWh al giorno per persona. Se tutta la paglia prodotta fosse bruciata in una centrale termica con un efficienza del 30% – questa proposta non andrebbe tanto bene per gli animali da allevamento che ne fanno un altro uso – l'elettricità generata sarebbe 0.6 kWh/gg per persona.

Il gas metano dalle discariche

Al momento la maggior parte del metano che fuoriesce dalle montagne di spazzatura proviene dalla componente organica, in particolare dagli avanzi e scarti del cibo. In questa maniera, fino a quando continueremo a gettare via cose come il cibo e i giornali, il gas di discarica rimarrà una fonte di energia rinnovabile – oltretutto potrebbe essere una buona idea dal punto di vista della lotta al cambiamento climatico quella di bruciare questo metano dal momento che è un gas ad effetto serra molto più dannoso della CO_2. Una discarica che riceve 7.5 milioni di tonnellate di rifiuti urbani all'anno arriva a generare 50 000 m^3 di metano all'ora.

Nel 1994 nel Regno Unito, le emissioni di gas metano da discarica furono stimate essere 0.05 m^3 per persona al giorno, ed avendo associata un'energia chimica di 0.5 kWh/gg per persona, avrebbero generato 0.2 kWh(e)/gg per persona, se fossero state convertite in elettricità con un'efficienza del 40%. Le emissioni di gas da discarica stanno diminuendo grazie ai cambi della legislazione ed oggigiorno sono all'incirca il 50% più basse.

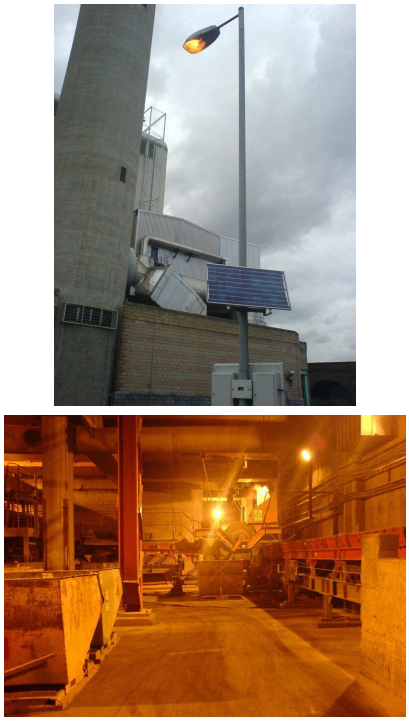


Figura D.4. La centrale SELCHP – la vostra spazzatura è il loro business.

Bruciare rifiuti domestici

La centrale SELCHP ["South East London Combined Heat and Power" – centrale a cogenerazione, calore ed elettricità, sita a sud-est di Londra. (N.d.T.)] [`www.selchp.com`] è una centrale da 35 MW ed è pagata per bruciare 420 000 tonnellate all'anno di spazzatura raccolta a Londra nei sacchetti neri. Lì si brucia tutto senza nessuna separazione dei rifiuti. Dopo l'incenerimento, i metalli ferrosi vengono rimossi per essere riciclati, i rifiuti pericolosi sono separati e inviati a discariche speciali e le rimanenti ceneri sono inviate in speciali centri dove sono trasformate in materiali inerti usati nella costruzione di strade e case. Il potere calorifico della spazzatura è 2.5 kWh/kg e l'efficienza termica della centrale è circa del 21%. In questo modo, 1 kg di rifiuti si trasforma in 0.5 kWh di elettricità. Le emissioni ammontano a circa 1000 g CO_2 per kWh. Della potenza generata (35 MW) circa 4 MW vengono usati dall'impianto stesso per far funzionare le macchine e i processi di filtraggio.

Sulla base di questa idea, se ogni provincia avesse uno di questi impianti e se ognuno di noi gli inviasse 1 kg di rifiuti al giorno, allora potremmo avere dall'incenerimento dei rifiuti 0.5 kWh(e) per persona al giorno.

Questo numero è simile a quello stimato sopra se si utilizzasse il metano emesso dalle discariche. Attenzione però, non possiamo avere en-

trambe le soluzioni. Infatti, se si incenerisse di più, questo significherebbe avere meno metano che fuoriesce dalla montagna di rifiuti in discarica. Per ulteriori dati e informazioni sull'incenerimento dei rifiuti si vedano la figura 27.2 a p. 228 e la figura 27.3 a p. 229.

Note ed approfondimenti

p.

316 *La potenza per unità di superficie se si usasse il salice, il miscanto o il pioppo per generare elettricità è 0.2 W/m².* Fonte: Resoconto dell'audizione del Comitato speciale su Scienza e Tecnologia del Parlamento inglese [Select Committee on Science and Technology, in inglese. (N.d.T.)] – Memorandum del Consiglio delle ricerche delle scienze Biotecnologiche e Biologiche [Biotechnology & Biological Sciences Research Council. (N.d.T.)] [`www.publications.parliament.uk/pa/ld200304/ldselect/ldsctech/126/4032413.htm`]. "Nel Nord Europa mediamente possono essere prodotte da coltura sostenibile 10 tonnellate per ettaro all'anno di biomassa legnosa secca ... In questo modo, una superficie di 1 km² ne produrrà 1000 tonnellate all'anno – a sufficienza per produrre 150 kWe con un impianto a bassa efficienza, oppure 300 kWe con uno ad alta efficienza." Questo significa 0.15–0.3 W(e)/m².
Si veda anche Layzell et al. (2006), [`3ap7lc`].

– *Colza.* Fonti: Bayer Crop Science (2003), Evans (2007), `www.defra.gov.uk`.

317 *Barbabietola da zucchero.* Fonti: `statistics.defra.gov.uk/esg/default.asp`

– *Bioetanolo dal mais.* Fonte: Shapouri et al. (1995).

318 *Bioetanolo dalla cellulosa.* Si veda anche Mabee et al. (2006).

– *Jatropha.* Fonti: Francis et al. (2005), Asselbergs et al. (2006).

– *Negli Stati Uniti, in pozze di acqua alimentate con CO_2 concentrata, le alghe possono crescere al ritmo di 30 g per metro quadro al giorno, producendo, così, 0.01 litri di biodiesel per metro quadro al giorno.* Fonte: Putt (2007). Questo calcolo ignora il costo energetico per far funzionare la piscina e il processamento delle alghe in biodiesel. L'autore di questo studio descrive come il bilanciamento energetico del progetto proposto per una fattoria di alghe da 100 acri [circa 400 000 m². (N.d.T.)] sia raggiunto con l'alimentazione da metano prodotto da un digestore di deiezioni animali. Infatti, così come descritto, il progetto produce meno potenza di quella del metano usato in ingresso. La fattoria di 100 acri utilizzerebbe 2600 kW di metano, il che corrisponde ad una densità di potenza di 6.4 W/m². Giusto per ricapitolare, la densità di potenza del biodiesel in uscita sarebbe appena di 4.2 W/m². Tutte le proposte per produrre biodiesel dovrebbero essere studiate con occhio critico!

319 *Una ricerca del National Renewable Energy Laboratory (Colorado) prevede che delle alghe verdi geneticamente modificate su un'area di 11 ettari nel deserto dell'Arizona siano in grado di produrre 300 kg di idrogeno al giorno.* Fonte: Amos (2004).

320 *Centrale termoelettrica di Elean.* Fonte: Government White Paper (2003). Centrale termoelettrica di Elean (36 MW) – la prima centrale termoelettrica a paglia della Gran Bretagna.
Produzione della paglia: `www.biomassenergycentre.org.uk`.

321 *Gas di discarica.* Fonti: comunicazione personale con Matthew Chester della City University (Londra); Meadows (1996), Aitchison (1996); Alan Rosevear, rappresentante britannico del Methane to Markets Landfill Gas Sub-Committee [Sottocomitato di Studio del Metano da Discarica. (N.d.T.)], maggio 2005 [`4hamks`].

E Riscaldamento II

Un edificio perfettamente sigillato e isolato manterrebbe per sempre il calore al suo interno e, in questa maniera, non avrebbe mai bisogno del riscaldamento. Le due principali ragioni per le quali gli edifici disperdono calore sono:

1. la **conduzione** – il calore attraversa direttamente i muri, le finestre e le porte;
2. la **ventilazione** – l'aria calda se ne va via attraverso i buchi, le fessure o i tubi messi lì apposta per garantire il ricambio dell'aria.

Nel modello standard che descrive le perdite di calore, queste due vie di dispersione del calore sono proporzionali alla differenza di temperatura dell'aria tra l'interno e l'esterno dell'edificio. Come vedremo, la conduzione rappresenta la maggiore delle due perdite per una media casa del Regno Unito.

Perdita da conduzione

La velocità con la quale il calore passa attraverso un muro, un pavimento o una finestra, è il prodotto di tre cose: la superficie del muro, una misura della conduttività del muro conosciuta a chi lavora nel settore come valore U o trasmittanza termica, e la differenza di temperatura –

$$\text{perdita di potenza} = \text{area} \times U \times \text{differenza di temperatura}.$$

Il valore U viene generalmente misurato in $\mathrm{W/m^2/K}$. (Un grado kelvin (1 K) è lo stesso di un grado Celsius (1 °C)). Grandi valori U portano ad avere grandi perdite di potenza. Quanto più il muro è spesso, tanto più il suo valore U è piccolo. Il doppio vetro è all'incirca tanto buono quanto un solido muro di mattoni. (Si veda tabella E.2).

I valori U degli oggetti che sono "connessi in serie", come ad esempio un muro e il suo rivestimento interno, possono essere combinati nello stesso modo con cui si trattano le conduttanze elettriche:

$$u_{\text{connessione in serie}} = 1 \Big/ \left(\frac{1}{u_1} + \frac{1}{u_2} \right).$$

A p.E si trova un esempio numerico che utilizza questa legge.

Perdita da ventilazione

Per calcolare quanto calore sia necessario per scaldare l'aria fredda che viene da fuori, abbiamo bisogno di conoscere la capacità termica dell'aria che è $1.2\,\mathrm{kJ/m^3/K}$.

	Valori U ($W/m^2/K$)		
	edifici vecchi	standard recenti	buone pratiche
Muri		0.45–0.6	0.12
Muro a mattoni pieni	2.4		
Muro esterno a mattoni pieni, 22 cm	2.2		
Blocchi forati con strato vuoto, 28 cm	1.0		
Blocchi forati con strato isolante, 28 cm	0.6		
Pavimenti		0.45	0.14
Struttura di legno	0.7		
Soletta di cemento	0.8		
Tetti		0.25	0.12
Piatto con strato isolante da 25 mm	0.9		
Spiovente con strato isolante da 100 mm	0.3		
Finestre			1.5
Vetro singolo	5.0		
Doppio vetro	2.9		
Doppio vetro, intercapedine da 20 mm	1.7		
Triplo vetro	0.7–0.9		

Tabella E.2. Valori U di pareti, pavimenti, tetti e finestre.

Chi si occupa di edifici, per convenzione, descrive le perdite di potenza dovute alla ventilazione di uno spazio come il prodotto tra il volume V dello stesso misurato in metri cubi, il numero N di ricambi dell'aria all'ora, la capacità termica C e la differenza di temperatura ΔT tra la parte esterna e quella interna dell'edificio.

$$\begin{aligned} \text{potenza (watt)} &= C\frac{N}{1\,\mathrm{h}}V(\mathrm{m}^3)\Delta T(\mathrm{K}) && \text{(E.1)} \\ &= (1.2\,\mathrm{kJ/m^3/K})\frac{N}{3600\,\mathrm{s}}V(\mathrm{m}^3)\Delta T(\mathrm{K}) && \text{(E.2)} \\ &= \frac{1}{3}NV\Delta T. && \text{(E.3)} \end{aligned}$$

cucina	2
bagno	2
salotto	1
camera da letto	0.5

Tabella E.1. Numero di ricambi d'aria all'ora: valori tipici di N per stanze isolate dagli spifferi. Le stanze piene di spifferi possono presentare un valore di $N = 3$. Il valore minimo di ricambi di aria è compreso tra 0.5 e 1.0, in modo da: fornire aria fresca per le attività umane in maniera adeguata, permettere di bruciare per riscaldamento combustibili in maniera sicura e prevenire possibili danni alle pareti causati da un eccesso di umidità presente nell'aria (EST 2003).

Perdite di energia e temperatura richiesta o fabbisogno termico (gradi giorno)

Dal momento che l'energia è data dal prodotto della potenza × il tempo, allora, l'energia persa dal processo di *conduzione* attraverso una data superficie per un piccolo periodo di tempo, si può scrivere come

$$\text{perdita di energia} = \text{superficie} \times U \times (\Delta T \times \text{periodo di tempo}),$$

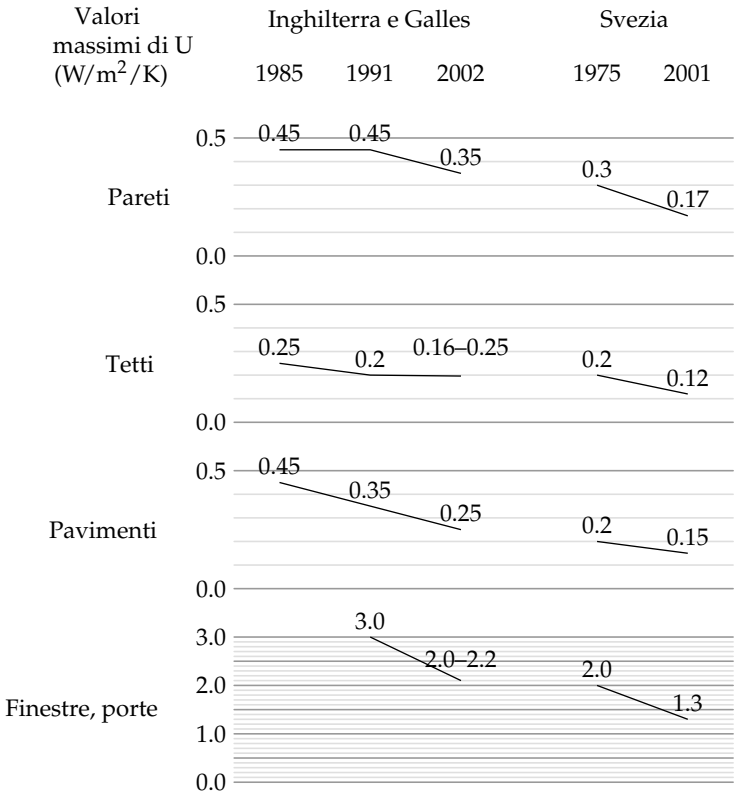


Figura E.3. Valori U imposti dalla legislazione britannica e svedese.

e l'energia persa dal processo di *ventilazione* come

$$\frac{1}{3}NV \times (\Delta T \times \text{periodo di tempo}).$$

Tutte e due le equazioni delle energie perse hanno la forma di

$$\text{Qualche Cosa} \times (\Delta T \times \text{periodo di tempo}),$$

dove questo "Qualche Cosa" viene misurato in watt per °C e la differenza di temperatura ΔT cambia in funzione del fatto che il giorno diventa notte e che le stagioni si susseguono l'un l'altra; possiamo, quindi, pensare ad un lungo periodo di tempo spezzettato in porzioni di tempo più piccole durante le quali la differenza di temperatura si mantiene all'incirca costante. Da un periodo di tempo ad un altro, la differenza di temperatura varia, ma il valore di questo Qualche Cosa non varia. Quando si studia la perdita totale di calore dovuta alla conduzione e alla ventilazione su un lungo periodo di tempo dobbiamo, quindi, moltiplicare due cose:

1. la somma di tutti questi Qualche Cosa (sommando la quantità superficie $\times$ U per tutte le pareti, le porte e le finestre e per tutti i tetti e i pavimenti, e la quantità $\frac{1}{3}NV$ per il volume);

2. la somma di tutte le differenze di temperatura × periodo di tempo associato (questo per ogni periodo di tempo).

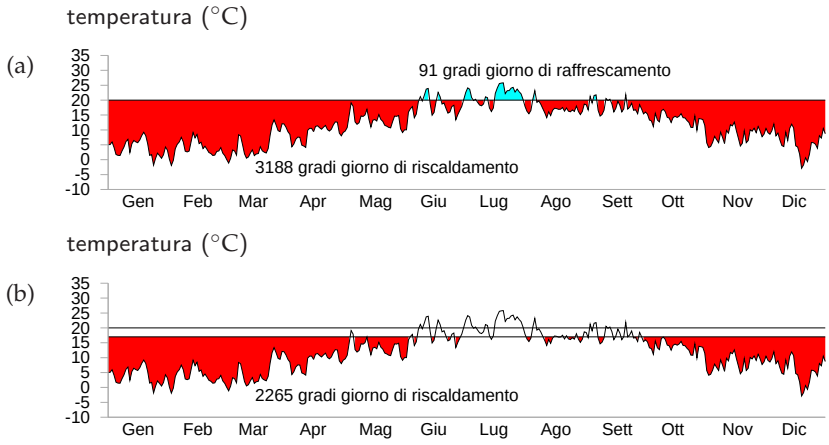


Figura E.4. Il fabbisogno termico a Cambridge nel 2006 visualizzato come un'area del grafico delle temperature medie giornaliere. (a) Termostato impostato a 20 °C, che comporta anche il raffrescamento in estate; (b) Termostato in inverno impostato a 17 °C.

Il primo fattore è una proprietà dell'edificio che si misura in watt per °C. Nel seguito ci si riferirà a questo numero come la *perdita* dell'edificio. (Questa perdita è chiamata talvolta *coefficiente globale di scambio termico* dell'edificio). Il secondo fattore è una proprietà legata al tempo che fa e si misura in "gradi giorno" dal momento che la differenza di temperatura è misurata in gradi e che i giorni sono un'unità di misura conveniente per pensare la durata del tempo. Se, per esempio, a casa vostra avete 18 °C e la temperatura esterna rimane a 8 °C per una settimana, allora diciamo che quella settimana ha contribuito con $10 \times 7 = 70$ gradi giorno alla somma ($\Delta T \times$ periodo di tempo). Chiameremo la somma di tutti i fattori ($\Delta T \times$ periodo di tempo) la *temperatura richiesta o fabbisogno termico* per un dato tempo.

$$\text{energia persa} = \text{perdita} \times \text{fabbisogno termico}.$$

Possiamo ridurre la perdita di energia riducendo sia la perdita dell'edificio sia la nostra temperatura richiesta o fabbisogno termico, o meglio ancora entrambi. Nel corso dei prossimi due paragrafi si guarderà in maniera più approfondita a questi due fattori, usando come caso concreto di studio una casa a Cambridge nel Regno Unito.

Esiste poi un terzo fattore che dobbiamo discutere. La perdita di energia viene compensata dal sistema di riscaldamento dell'edificio, così come anche da altre fonti di energia come gli occupanti, gli apparecchi accesi, i fornelli e il sole. Concentrando la nostra attenzione sull'impianto di riscaldamento, l'energia *prodotta* da questo non è la stessa di quella *consumata*. Le due energie sono in relazione attraverso il *coefficiente di prestazione* dell'impianto.

$$\text{energia consumata} = \text{energia prodotta}/\text{coefficiente di prestazione}.$$

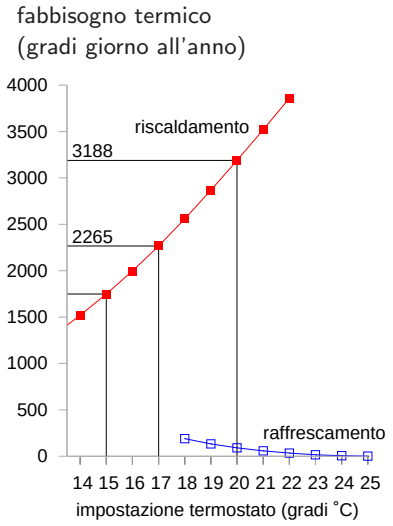


Figura E.5. Fabbisogno termico a Cambridge, in gradi giorno all'anno, in funzione di come si imposta il termostato in (°C). Abbassando il termostato in inverno da 20 °C a 17 °C si riduce il fabbisogno termico di calore del 30%, da 3188 a 2265 gradi giorno. Alzando il termostato in estate da 20 °C a 23 °C si riduce il fabbisogno termico di raffrescamento del 82%, da 91 a 16 gradi giorno.

Nel caso, ad esempio, di una caldaia a condensazione che brucia gas naturale, il coefficiente di prestazione è 90%, perché il restante 10% viene perso attravero il camino.

Riassumendo, quindi, possiamo ridurre il consumo di energia di un edificio in tre modi:

1. riducendo il fabbisogno termico;
2. riducendo la perdita; o
3. aumentando il coefficiente di prestazione.

Per ognuna di queste opzioni daremo ora una stima del loro potenziale. (Una quarta opzione – aumentare i guadagni di calore incidentale dell'edificio, in particolare dal sole – può essere utile ma non la tratterò).

Fabbisogno termico

Possiamo visualizzare in maniera carina il fabbisogno termico su di un grafico dove sono riportate le temperature esterne a vari istanti di tempo (figura E.4). Per un edificio con una temperatura interna di 20 °C, il fabbisogno termico totale è l'*area* compresa tra la linea orizzontale dei 20 °C e il valore delle temperature esterne. Nella figura E.4 possiamo vedere che, durante tutto un anno a Cambridge, mantenere la temperatura interna costante tutto l'anno a 20 °C richiede un fabbisogno energetico di 3188 gradi giorno per il riscaldamento e di 91 gradi giorno per il raffreddamento. Questi due dati ci permettono, in maniera semplice, di valutare l'effetto che ha la regolazione verso il basso del termostato e quello di vivere senza aria condizionata. Abbassando il termostato a 17 °C, il fabbisogno termico per il riscaldamento diminuisce da 3188 gradi giorno a 2265 gradi giorno (figura E.4b), che corrisponde ad una riduzione della domanda di riscaldamento del 30%. Girando, ancora, il termostato a 15 °C, il fabbisogno termico si riduce da 3188 a 1748 gradi giorno, ovvero un 45% di riduzione.

Questi calcoli ci danno una stima grossolana dei benefici indotti dalla regolazione in giù del termostato. Un stima esatta sarà possibile solo se teniamo in conto due dettagli: il primo è che gli edifici assorbono energia in maniera naturale dal sole aumentando la temperatura interna rispetto a quella esterna anche senza riscaldamento; il secondo è che gli occupanti assieme con i loro apparecchi elettronici ed elettrici emettono energia, permettendo di tagliare sulla domanda di caldo artificiale della caldaia. Il fabbisogno termico di una data località, espresso convenzionalmente in gradi giorno, è una cosa un po' difficile da maneggiare. Personalmente trovo difficile ricordare numeri come "3500 gradi giorno". Possiamo rendere questa misura più intellegibile e forse più semplice per lavorarci, dividendola per 365 che sono i giorni in un anno, ottenendo il fabbisogno termico in "gradi giorno al giorno", o se il lettore preferisce, in semplici "gradi". La Figura E.6 presenta il fabbisogno termico ridisegnato in gradi. In questa

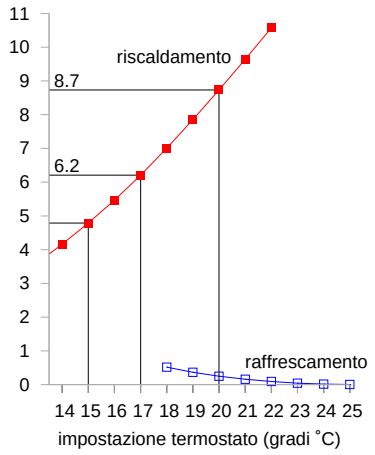


Figura E.6. Fabbisogno termico a Cambridge nel 2006 ridisegnato usando come unità di misura i gradi giorno al giorno, conosciuti anche come gradi. In questo modo, il fabbisogno termico risulta essere la media della differenza di temperatura tra l'esterno e l'interno.

Perdita da conduzione	superficie (m^2)	valore U ($W/m^2/°C$)	perdita (W/°C)
Superfici orizzontali			
Tetto spiovente	48	0.6	28.8
Tetto piatto	1.6	3	4.8
Pavimento	50	0.8	40
Superfici verticali			
Pareti dell'estensione	24.1	0.6	14.5
Pareti principali	50	1	50
Pareti fini (8cm)	2	3	6
Porte a vetro singolo e finestre	7.35	5	36.7
Finestre a doppi vetri	17.8	2.9	51.6
Perdita conduttiva totale			232.4

Perdita da ventilazione	volume (m^3)	N (ricambi d'aria all'ora)	perdita (W/°C)
Stanze da letto	80	0.5	13.3
Cucina	36	2	24
Ingresso	27	3	27
Altre stanze	77	1	25.7
Perdita da ventilazione totale			90

Tabella E.8. Dettaglio della perdita conduttiva e da ventilazione della mia casa prima del 2006. Ho considerato la parete in comune con l'appartamento a fianco come perfettamente isolata anche se questa ipotesi potrebbe essere sbagliata nel caso in cui l'intercapedine tra le pareti fosse ben ventilata.

I parametri soggetti a modifica dopo l'intervento del 2006 che viene descritto qui di seguito, sono messi in evidenza in rosso.

maniera, il fabbisogno termico risulta essere semplicemente la *media* della differenza di temperatura tra l'esterno e l'interno. I fabbisogni termici calcolati prima, sono quindi: 8.7 °C, per il termostato posizionato a 20 °C; 6.2 °C, per quello a 17 °C; 4.8 °C, per quello a 15 °C.

Perdita – l'esempio di casa mia

Abito in un appartamento di un villetta bifamigliare composto da tre stanze da letto e costruito intorno al 1940 (figura E.7). Nel 2006 la cucina è stata leggermente allargata e nella maggior parte delle finestre sono stati messi i doppi vetri. La porta di ingresso e quella del retro, però, furono entrambe lasciate con il vetro singolo.

Sempre con riferimento all'anno 2006, le stime che ho fatto della perdita della casa sono riportate in tabella E.8. La perdita totale della casa era 322 W/°C (or 7.7 kWh/gg/°C) di cui quella conduttiva era il 72% mentre quella da ventilazione il 28%. La perdita da conduzione è dovuta a tre componenti, ognuna di peso all'incirca uguale: le finestre; le pareti; il pavimento e il soffitto.

Al fine di comparare le perdite di due case che hanno superfici calpestabili diverse , possiamo dividere il valore della perdita totale per l'area

Figura E.7. La mia casa.

del pavimento; questo numero dà il *coefficiente di perdita di calore* dell'edificio che è misurato in $W/°C/m^2$. Allora, il coefficiente di perdita di calore di casa mia (superficie totale del pavimento $88\,m^2$) è

$$3.7\,W/°C/m^2.$$

Usiamo questi numeri per stimare il consumo giornaliero della casa, prima, in una fredda giornata invernale e, poi, lungo tutto l'anno.

Nel primo caso, ipotizzando che la temperatura esterna sia $-1\,°C$ e quella interna $19\,°C$, la differenza di temperatura è $\Delta T = 20\,°C$. Se questa differenza viene mantenuta per 6 ore al giorno, allora l'energia persa al giorno è

$$322\,W/°C \times 120\,\text{gradi giorno} \simeq 39\,kWh.$$

Se, invece, la temperatura interna viene mantenuta a $19\,°C$ per 24 ore al giorno, allora, l'energia persa al giorno è

$$155\,kWh/gg.$$

Al fine di stimare la perdita di calore durante tutto l'anno, prendiamo il fabbisogno termico di Cambridge presentato in figura E.5. Con il termostato a $19\,°C$, il fabbisogno termico nel 2006 è stato di 2866 gradi giorno. La perdita media di calore, se la casa fosse sempre tenuta alla temperatura di $19\,°C$, sarebbe quindi:

$$7.7\,kWh/gg/°C \times 2866\,\text{gradi giorno/anno}/(365\,gg/\text{anno}) = 61\,kWh/gg.$$

Abbassando il termostato a $17\,°C$, il fabbisogno termico cala a $48\,kWh/gg$. Alzandolo alla temperatura tropicale di $21\,°C$, la perdita di calore media è di $75\,kWh/gg$.

Effetti di uno strato di isolamento in più

Nel corso dell'anno 2007, ho apportato le seguenti modifiche alla casa:

1. Aggiunta di schiuma isolante nella cavità del muro (cosa che non era presente nelle pareti principali della casa) – si veda figura 21.5.

2. Aumento dello strato di isolamento del tetto.

3. Aggiunta di una seconda porta di ingresso di fronte a quella vecchia – si veda figura 21.6.

4. Sostituzione della porta del retro con una con doppi vetri.

5. Sostituzione del singolo vetro con uno doppio nell'unica finestra che ancora non ce l'aveva.

Qual è la stima del nuovo valore di perdita di calore?

La perdita totale prima dei nuovi lavori era 322 W/°C.

L'aggiunta della schiuma isolante nella cavità delle pareti principali (nuovo valore U: 0.6) riduce la perdita della casa di 20 W/°C. L'aumento delle strato di isolamento del sottotetto (nuovo valore U: 0.3) dovrebbe ridurre la perdita di 14 W/°C. Le modifiche ai vetri (nuovo valore U compreso tra 1.6 e 1.8) dovrebbe ridurre la perdita da conduzione di 23 W/°C, mentre quella da ventilazione di qualcosa come 24 W/°C. Il risultato finale è una riduzione totale della perdita del 25%, da circa 320 a 240 W/°C (da 7.7 a 6 kWh/gg/°C). La Tabella E.9 mostra la stima dei risparmi per ognuna delle modifiche apportate. In tutto, il coefficiente di perdita di calore della casa (superficie totale dei pavimenti 88 m^2) si è ridotto di circa il 25%, da 3.7 a 2.7 W/°C/m^2. (Siamo ancora distanti, però, dal valore di 1.1 W/°C/m^2 richiesto dal codice delle costruzioni per una casa "sostenibile").

È davvero frustrante cercare di incidere significativamente sulle perdite di una casa già costruita! Come abbiamo appena visto, risulta molto più facile abbassare il termostato per riuscire a tagliare, e di molto, la perdita di calore. Il fatto di girare il termostato da 20 a 17 °C permette una riduzione del 30%.

Combinando assieme queste due azioni – le modifiche fisiche e il tenere basso il termostato – , secondo questo modello, la perdita di calore potrebbe essere ridotta di circa il 50%. Dal momento che un parte del calore viene generato in casa dai raggi del sole, dagli apparecchi accesi e dagli esseri umani, allora la riduzione del consumo di gas dovrebbe essere più del 50%.

Dopo aver fatto queste modifiche, ho controllato i consumi ogni settimana. Posso assicurare che le bollette per il riscaldamento sono scese più del 50%. Come mostrato nella figura 21.4, il consumo di gas è diminuito da 40 kWh/gg a 13 kWh/gg – ovvero, una riduzione del 67%.

Riduzione della perdita attraverso un rivestimento interno delle pareti

Potete ridurre la perdita delle vostre pareti ricoprendo le superfici *interne* con un strato isolante? La risposta è si, ma ci potrebbero essere due

– Schiuma isolante nella cavità del muro (applicabile a due terzi della superficie della parete)	4.8 kWh/gg
– Miglioramento isolamento del tetto	3.5 kWh/gg
– Riduzione della conduzione grazie a doppi vetri in due porte e una finestra	1.9 kWh/gg
– Riduzione della ventilazione nell'ingresso e nella cucina grazie agli interventi su porte e finestre	2.9 kWh/gg

Tabella E.9. Dettaglio delle stime della riduzione della perdita di calore in casa mia durante una fredda giornata invernale.

complicazioni. La prima è che lo spessore dei pannelli interni potrebbe essere più grande di quanto potreste pensare. Per trasformare una parete di mattoni solidi da 22 cm (valore U: 2.2 W/m^2/K) in una con un valore decente di 0.30 W/m^2/K, è necessario applicare dei pannelli da 6 cm circa di spessore [65h3cb]. La seconda è che si potrebbe formare della condensa sulle superfici interne degli strati di isolante, causando, così, dei problemi di umidità.

Se non siete alla ricerca di una così grande riduzione della perdita attraverso le pareti, potreste, allora, usare dei pannelli più sottili. Per esempio, potreste comprare quelli dallo spessore di 1.8 cm con un valore U di 1.7 W/m^2/K. Con queste coperture, il valore U sarebbe ridotto da 2.2 W/m^2/K a:

$$1 \Big/ \left(\frac{1}{2.2} + \frac{1}{1.7} \right) \simeq 1\,\mathrm{W/m^2/K}.$$

Senza dubbio una riduzione che ha senso fare.

Ricambio dell'aria

Una volta che un edificio è ben isolato, la principale perdita di calore sarà dovuta alla ventilazione (ovvero il ricambio dell'aria) piuttosto che alla conduzione. La perdita di calore attraverso la ventilazione può essere ridotta trasferendo il calore dell'aria in uscita verso quella in ingresso. Una grande parte di questo calore, infatti, può essere spostato senza nessun bisogno di ulteriore energia. Il trucchetto consiste nel'uso del meccanismo usato dal nostro naso, proprio come ha scoperto il processo di selezione naturale. Infatti, un naso riscalda l'aria in ingresso grazie al raffreddamento di quella in uscita. Si crea, così, un gradiente di temperatura lungo tutto il naso che fa sì che le pareti vicino alle narici siano più fredde. Tanto il vostro naso è lungo e tanto meglio lavora come uno scambiatore di calore. Nei nasi presenti in natura, il flusso di aria cambia direzione in maniera alternata a seconda se è in ingresso o in uscita utilizzando lo stesso condotto. Un altro modo per costruire il meccanismo del naso è quello di costruire, due condotti, uno per il flusso in ingresso e uno per quello in uscita, in maniera che i due flussi siano separati fisicamente e allo stesso tempo il calore possa essere scambiato attraverso la parete di separazione. Questo è il modo con cui un naso lavora negli edifici. Per convenzione, questi nasi si chiamano scambiatori di calore.

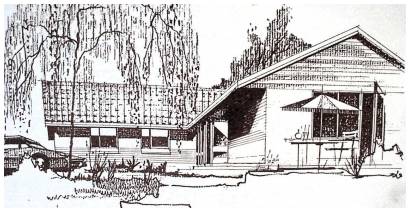


Figura E.10. La casa Heatkeeper Serrekunda.

Una casa efficiente energeticamente

Nel 1984, Alan Foster, un consulente in energia, costruì vicino a Cambridge una casa energeticamente efficiente; le misure dettagliate relative ai consumi energetici mi sono state messe gentilmente a disposizione. La villetta, che si rifà al progetto scandinavo chiamato "Heatkeeper Serrekunda" (figura E.10), è di quelle ad un piano solo con una struttura di legno,

ha una superficie calpestabile di 140 m^2 ed è composta da tre stanze da letto, uno studio, due bagni, un soggiorno, una cucina e un ingresso. Le pareti esterne di legno furono acquistate prefabbricate da una società scozzese e le parti principali della casa richiesero solo pochi giorni per essere assemblate in loco.

Le pareti presentano uno spessore di 30 cm e hanno un valore U di 0.28 $W/m^2/°C$. Partendo dall'interno verso l'esterno, sono composte da un pannello in cartongesso di 13 mm , un'intercapedine di aria di 27 mm, uno strato per la protezione contro l'umidità, un pannello di legno compensato di 8 mm, uno strato di lana di roccia di 90 mm, uno pannello di legno truciolato impregnato di bitume di 12 mm, un'intercapedine di 50 mm e, infine, una parete di mattoni profonda 103 mm. Il modo con cui è stato costruito il soffitto è simile con in più l'aggiunta di uno strato di lana di roccia da 100–200 mm. Il soffitto ha un valore U di 0.27 $W/m^2/°C$ e il pavimento di 0.22 $W/m^2/°C$.

Le finestre hanno i doppi vetri (valore U: 2 $W/m^2/°C$) e la superficie esterna del vetro interno ha subito un trattamento speciale sulla superficie per ridurre la radiazione del calore verso fuori. Le finestre sono posizionate in maniera da avvantaggiarsi del contributo del sole e contribuire così al riscaldamento degli spazi della casa per circa il 30% del fabbisogno.

La casa risulta ben sigillata e ogni porta e finestra ha delle guarnizioni in neoprene. La casa viene riscaldata con aria calda pompata attraverso delle griglie poste sul pavimento; in inverno, un sistema di ventilazione assicura il ricambio dell'aria nelle varie stanze espellendo fuori quella esausta e prendendo quella fresca dal sottotetto. L'aria in ingresso e quella in uscita passano attraverso uno scambiatore di calore (figura E.11), che recupera il 60% del calore da quella in uscita. Lo scambiatore di calore è un apparecchio passivo, cioè non usa energia: si comporta come un grande naso, riscaldando l'aria in ingresso con quella in uscita. In una fredda giornata invernale, mentre la temperatura esterna era di $-8\,°C$ e quella del sotto tetto di $0\,°C$, quella in uscita dallo scambiatore verso l'interno era di $+8\,°C$.

Figura E.11. Lo scambiatore di calore di Heatkeeper.

Nei primi dieci anni, il riscaldamento fu interamente garantito da una caldaia elettrica che riscaldava 600 litri durante la notte quando il costo dell'elettricità era minore. Poi la rete del gas è stata allacciata alla casa e il riscaldamento degli spazi è ora ottenuto grazie ad una caldaia a gas a condensazione.

La perdita da conduzione e ventilazione è 4.2 kWh/gg/°C. Il *coefficiente di perdita di calore* (la perdita per metro quadro della superficie del pavimento) è 1.25 $W/m^2/°C$ (cfr. quella di casa mia è 2.7 $W/°C/m^2$).

Il consumo medio per il riscaldamento degli spazi con la casa occupata da due persone e con il termostato fissato, durante il giorno, tra 19 e 20 °C è stato di 8100 kWh all'anno, ovvero 22 kWh/gg; il consumo totale di energia per tutti gli altri scopi è stato circa di 15 000 kWh all'anno, ovvero 40 kWh/gg. Espressi come energia media per unità di superficie, questi

dati diventano 6.6 W/m^2 per il riscaldamento e 12.2 W/m^2 come consumo totale.

La Figura E.12 compara il consumo di potenza per unità di superficie di questa casa tipo Heatkeeper con quello di casa mia (prima e dopo gli interventi per tirare su l'efficienza) e con la media europea. Quelli di casa mia, dopo gli interventi sono vicino a quelli di Heatkeeper, grazie al fatto che si è adottato una temperatura del termostato inferiore.

Valori di riferimento per case e uffici

Lo standard tedesco per definire una Casa passiva fissa il valore del consumo per il riscaldamento e il raffrescamento in 15 kWh/m^2/anno che equivale a 1.7 W/m^2, e quello del consumo totale di potenza in 120 kWh/m^2/anno, che equivale a 13.7 W/m^2.

Il consumo medio di energia nel settore dei servizi del Regno Unito è 30 W/m^2.

Un ufficio energeticamente efficiente

La fondazione National Energy Foundation si è costruita un edificio a bassa energia e basso costo. Presenta pannelli solari per l'acqua calda, quelli fotovoltaici (FV) che generano 6.5 kW di elettricità ed è riscaldata da una pompa di calore di 14-kW ad acqua e, se necessario, da una stufa a legna. La superficie totale è di 400 m^2 e il numero degli occupanti è circa 30. L'edificio è su un piano solo. Le pareti contengono al loro interno uno strato di lana di roccia da 300 mm. In inverno il coefficiente di prestazione della pompa di calore è stato di 2.5. L'energia usata è 65 kWh all'anno per metro quadro della superficie calpestabile (ovvero 7.4 W/m^2). Il sistema fotovoltaico ne fornisce almeno il 20%.

Uffici moderni

Gli edifici che ospitano nuovi uffici sono spesso presentati con grande clamore come grandi amici dell'ambiente. Andiamo a controllare i numeri.

L'edificio William Gates dell'Università di Cambridge ospita ricercatori in scienza dei computer, personale amministrativo e un piccolo bar. La sua superficie è 11 110 m^2 e il suo consumo di energia è 2392 MWh/anno. Questo significa che la potenza per unità di superficie è 215 kWh/m^2/anno, ovvero 25 W/m^2. Questo edificio vinse nel 2001 il premio RIBA sulla base del suo consumo stimato. "Gli architetti hanno inserito nell'edificio molti accorgimenti amici dell'ambiente". [5dhups]

Ma siamo sicuri che questi edifici siano così interessanti? Poco vicino, l'edificio Rutherford, costruito negli anni settanta senza tante pretese ecologiche, anzi anche senza doppi vetri, ha un superficie calpestabile di 4998 m^2 e consuma 1557 MWh all'anno; questo significa 0.85 kWh/gg/m^2,

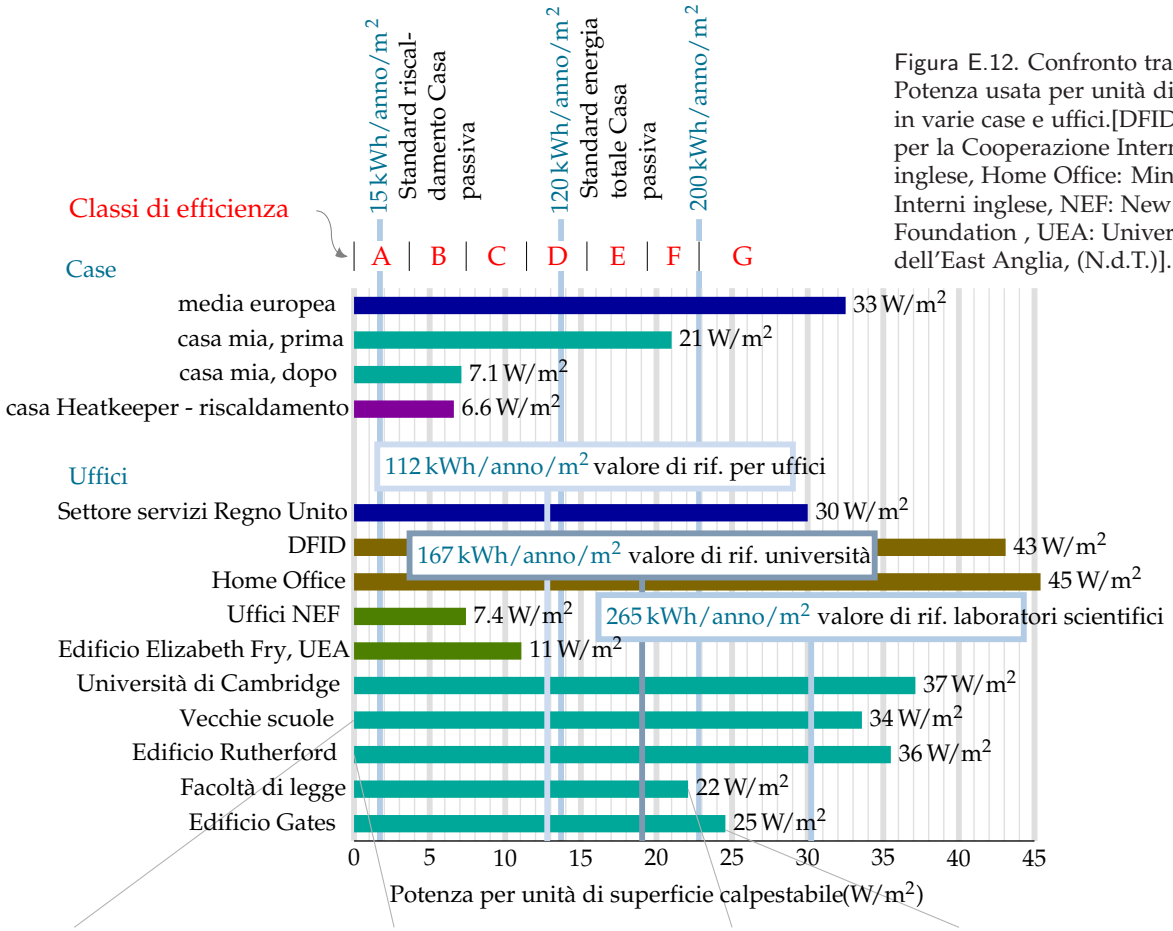
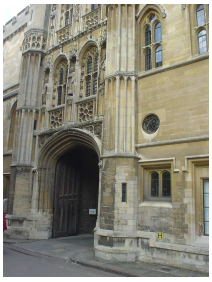
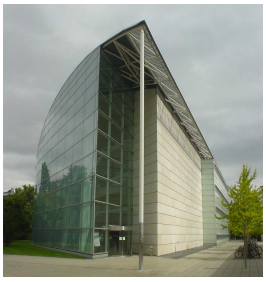


Figura E.12. Confronto tra edifici. Potenza usata per unità di superficie in varie case e uffici.[DFID: Ministro per la Cooperazione Internazionale inglese, Home Office: Ministero degli Interni inglese, NEF: New Economics Foundation , UEA: Università dell'East Anglia, (N.d.T.)].



Vecchie scuole

L'edificio Rutherford



La facoltà di legge

L'edificio Gates

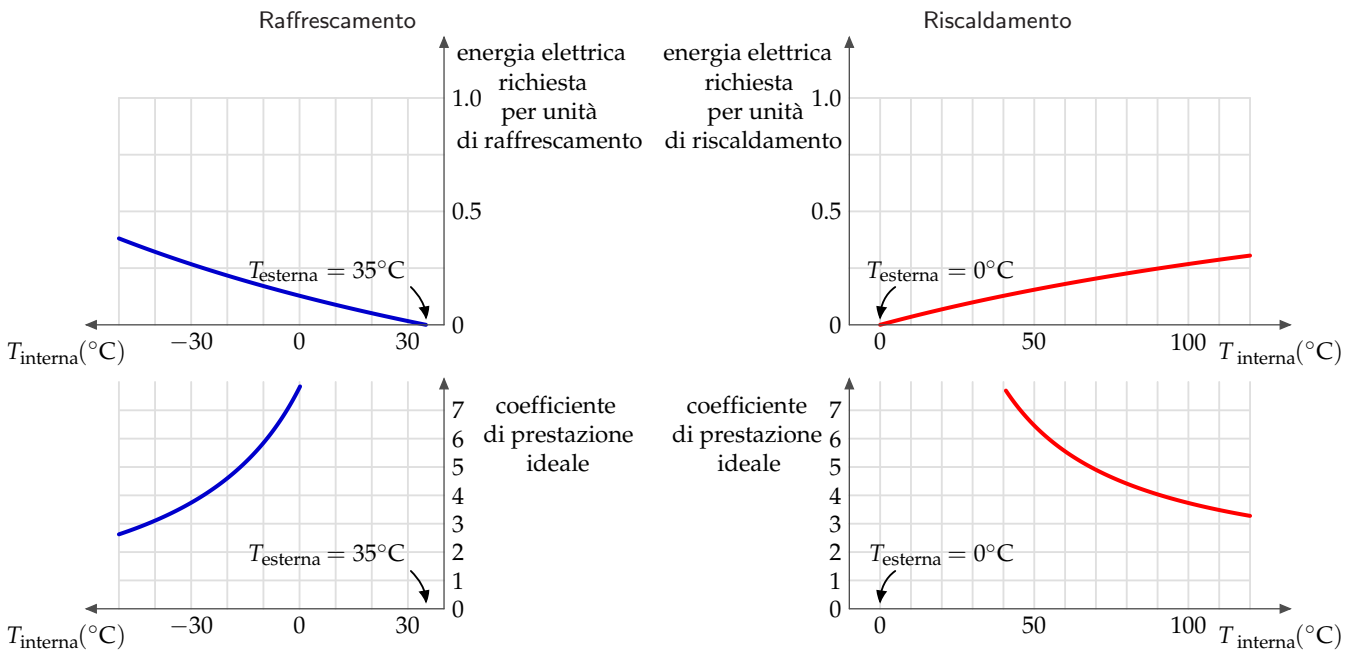


Figura E.13. Efficienze ideali delle pompe di calore. In alto a sinistra: energia elettrica richiesta, nel rispetto dei limiti imposti dalle leggi della termodinamica, nel caso ideale di pompaggio del calore *fuori* da uno spazio alla temperatura $T_{interna}$, quando questo calore viene trasferito verso uno spazio esterno alla temperatura $T_{esterna} = 35\,°C$. In alto a destra: energia elettrica richiesta nel caso ideale di pompaggio del calore *dentro* ad uno spazio alla temperatura $T_{interna}$, quando questo calore viene estratto da uno spazio esterno alla temperatura $T_{esterna} = 0\,°C$.
In basso: valori del "coefficiente di prestazione" in cui si esprime l'efficienza come il calore pompato per unità di energia elettrica. In pratica, per quanto ne so, le pompe di calore ad acqua installate a regola d'arte e le migliori pompe di calore ad aria generalmente presentano coefficienti di prestazione di 3 o 4; in ogni caso, le normative del governo del Giappone hanno permesso al coefficiente di prestazione di raggiungere il valore di 6.6.

ovvero 36 W/m^2. In questa maniera, l'edificio che ha vinto dei riconoscimenti e premi è appena migliore del 30% in termini di potenza per unità di superficie calpestabile, rispetto al suo semplice cugino settantottardo. La Figura E.12 mette a confronto questi edifici con i dati di quelli della facoltà di legge e delle vecchie scuole, che sono uffici costruiti prima del 1890. A dispetto di tutte le fanfare, la differenza tra quelli nuovi e quelli vecchi è veramente molto deludente!

Si noti bene che le potenze di consumo, per unità di superficie, degli edifici sono espresse nelle stesse unità di misura (W/m^2) di quelle delle potenze, sempre per unità di superficie , discusse alle pagine 49, 53 e 196. Il confronti dei numeri dei consumi e della produzione ci aiuta a capire quanto sia difficile alimentare i moderni edifici basandosi unicamente su fonti rinnovabili locali. La potenza per unità di superficie dei biodiesel (figura 6.11, p.49) è 0.5 W/m^2 mentre quella di un campo eolico 2 W/m^2 e quella di un campo solare 20 W/m^2 (figura 6.18, p.53); solo i pannelli per l'acqua calda raggiungono una buona potenza per unità di superficie, ovvero 53 W/m^2 (figura 6.3, p.44).

Modi per migliorare il coefficiente di prestazione

Si potrebbe pensare che il coefficiente di prestazione di una caldaia a gas a condensazione del 90% sia piuttosto difficile da battere. Invece può essere significativamente migliorato dalle pompe di calore. Infatti, mentre il boiler a condensazione prende l'energia chimica e ne trasforma il 90%

in calore utile, la pompa di calore prende un po' di energia elettrica e la usa per *muovere* il calore da un posto ad un altro (per esempio dall'esterno all'interno di un edificio). Generalmente la quantità di calore utile fornita è molto maggiore di quella dell'elettricità impiegata. Di norma, è normale avere un coefficiente di prestazione del valore di 3 o 4.

Teoria delle pompe di calore

Nel seguito vengono riportate le formule che descrivono l'efficienza ideale di una pompa di calore, ovvero l'energia elettrica richiesta per unità di calore pompato. Se stiamo pompando calore da un posto esterno alla temperatura T_1 verso uno interno ad una temperatura più alta T_2, avendo avuto cura di scrivere il valore di entrambe le temperature rispetto allo zero assoluto (cioè, se T_{in} è fornita in gradi centigradi, T_2 in gradi Kelvin è uguale a $273.15 + T_{\text{in}}$), allora l'efficienza ideale è:

$$\text{efficienza} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}.$$

Mentre, se stiamo pompando calore fuori da un posto alla temperatura T_2 verso un'altro esterno più caldo alla temperatura T_1, allora l'efficienza ideale è:

$$\text{efficienza} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}.$$

Questi limiti teorici potrebbero essere raggiunti solo se i sistemi che pompano il calore facessero questa operazione infinitamente piano. Si osservi bene il fatto che quanto più la temperatura interna T_2 è vicina a quella esterna T_1, tanto più l'efficienza ideale è grande.

Mentre, in teoria, le pompe di calore ad acqua inserite nel terreno [in italiano sono chiamate anche geotermiche, (N.d.T.)] potrebbero funzionare meglio di quelle ad aria perché la temperatura del terreno è generalmente più vicina alla temperatura interna della casa rispetto a quella dell'aria, nella pratica le pompe di calore ad aria potrebbero rivelarsi la scelta migliore e più semplice. Nelle città, in particolare, ci potrebbero essere degli elementi di incertezza sul fatto che nel futuro le pompe di calore geotermiche possano essere meglio perché se sempre più persone le usano in inverno allora il terreno diventa più freddo; questo problema di scarico termico selvaggio può verificarsi durante l'estate nelle città dove troppi edifici usano pompe di calore geotermiche per l'aria condizionata collegate con il terreno (che dovrei, allora, definirlo meglio come un "pozzo per l'aria").

Capacità termica:	$C = 820\,\text{J/kg/K}$
Conduttività:	$\kappa = 2.1\,\text{W/m/K}$
Densità:	$\rho = 2750\,\text{kg/m}^3$
Capacità termica per unità di volume:	$C_V = 2.3\,\text{MJ/m}^3\text{/K}$

Tabella E.14. Dati fondamentali per il granito. (Faccio riferimento al granito come tipico esempio di roccia)

Il riscaldamento e il suolo

Eccoci, allora, ad un interessante calcolo da fare. Supponete di avere sul

tetto di casa vostra dei pannelli solari termici e che, ogni qualvolta l'acqua nei pannelli supera i 50°C, l'acqua sia pompata nella roccia sotto la casa. Quando arriveranno i mesi grigi, freddi e uggiosi, potrete, allora, usare il calore immagazzinato nella roccia per scaldare casa vostra. Quanto grande, all'incirca, dovrebbe essere la roccia alla temperatura di 50°C per immagazzinare energia a sufficienza per scaldare la casa per un intero mese? Ipotizziamo che si voglia avere 24 kWh al giorno per 30 giorni, e che la casa all'interno sia mantenuta a 16°C. La capacità termica del granito è $0.195 \times 4200\,\mathrm{J/kg/K} = 820\,\mathrm{J/kg/K}$. La massa di granito necessaria è allora:

$$\begin{aligned}\text{massa} &= \frac{\text{energia}}{\text{capacità termica} \times \text{differenza di temperatura}}\\ &= \frac{24 \times 30 \times 3.6\,\mathrm{MJ}}{(820\,\mathrm{J/kg/°C})(50\,\mathrm{°C} - 16\,\mathrm{°C})}\\ &= 100\,000\,\mathrm{kg},\end{aligned}$$

ovvero 100 tonnellate, che corrispondono ad un blocco di roccia delle dimensioni di $6\,\mathrm{m} \times 6\,\mathrm{m} \times 1\,\mathrm{m}$.

	(W/m/K)
acqua	0.6
quarzo	8
granito	2.1
crosta terrestre	1.7
terreno secco	0.14

Tabella E.15. Valori di conducibilità termica. Per ulteriori dati si veda tabella E.18, p339.

Stoccaggio nel sottosuolo senza pareti

OK, abbiamo appena calcolato le dimensioni di una riserva di calore utile del sottosuolo. Ma quanto è difficile mantenere il calore là sotto? Dovrete, forse, avvolgere il blocco di roccia con un sacco di materiale isolante? In realtà, si può verificare che il suolo in sé stesso è abbastanza un buon isolante. Se si inviasse un picco di calore nel terreno attraverso un buco, questo si diffonderà secondo la formula

$$\frac{1}{\sqrt{4\pi\kappa t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4(\kappa/(C\rho))t}\right),$$

dove κ è la conducibilità termica del terreno, C la sua capacità termica e ρ la sua densità. Questa descrive una curva a campana con larghezza

$$\sqrt{2\frac{\kappa}{C\rho}t}.$$

Per esempio, dopo sei mesi ($t = 1.6 \times 10^7\,\mathrm{s}$) e usando i numeri riferiti al granito (ovvero, $C = 0.82\,\mathrm{kJ/kg/K}$, $\rho = 2500\,\mathrm{kg/m^3}$, $\kappa = 2.1\,\mathrm{W/m/K}$), la larghezza risulta essere uguale a 6 m.

Mentre usando i numeri riferiti all'acqua (ovvero, $C = 4.2\,\mathrm{kJ/kg/K}$, $\rho = 1000\,\mathrm{kg/m^3}$, $\kappa = 0.6\,\mathrm{W/m/K}$), la larghezza risulta essere uguale a 2 m.

In questo modo, se la regione di stoccaggio del calore fosse più grande di $20\,\mathrm{m} \times 20\,\mathrm{m} \times 20\,\mathrm{m}$, allora, la gran parte del calore sarebbe ancora lì presente dopo sei mesi (questo perché 20 m risulta significativamente più grande di 6 m o 2 m).

Limiti delle pompe di calore geotermiche

Il basso valore di conducibilità termica del suolo è, però, una lama a doppio taglio. Da un lato, grazie a questo fatto, il terreno può trattenere a lungo il calore, mentre, dall'altro, significa che non è semplice trasportarlo in maniera rapida dentro e fuori dal sottosuolo. Esploriamo, ora, in quale modo la conduttività del terreno limita l'uso delle pompe di calore geotermiche.

Consideriamo un quartiere con una densità di popolazione molto elevata. Possono *tutti* gli abitanti installarsi una pompa di calore geotermica senza fare ricorso ad un riempimento attivo di calore in estate (così come discusso a p.169)? Il problema sta nel fatto che se tutti quanti estraggono nello stesso momento il calore dal terreno, potrebbero congelarlo in blocco. Cercherò di capire la questione usando due modi. Il primo si riferisce al flusso naturale di energia dal terreno a fuori e viceversa, sia in estate sia in inverno. Se il flusso di calore che si vuole estrarre in inverno dal suolo fosse molto più grande di questi flussi naturali, allora, sapremmo per certo che alla lunga questa operazione andrà a modificare significativamente le temperature del terreno, dimostrandosi, così, una strada non percorribile. In questo calcolo ipotizzerò che il terreno appena sotto la superficie sia mantenuto ad una temperatura che varia molto lentamente verso il basso o verso l'alto durante l'anno grazie all'intervento combinato del sole, dell'aria, delle nuvole e della notte (figura E.16).

Risposta alle variazioni esterne di temperatura

La comprensione di come la temperatura del suolo risponda alle variazioni del flusso di calore che va dentro e fuori, richiede delle nozioni di matematica avanzata che ho riportato nel riquadro E.19 (p.342).

La preziosa ricompensa di tutti questi calcoli è un grafico molto bello (figura E.17) che mostra come la temperatura varia nel tempo alle diverse profondità. Questo grafico mostra la riposta per ogni materiale se si prende come unità di misura la sua *dimensione caratteristica* z_0 (equazione E.7) che dipende, da un lato, dalla conduttività κ e dalla capacità termica C_V del materiale stesso, e, dall'altro, dalla frequenza ω con cui variano le temperature esterne. (Possiamo scegliere di guardare sia a variazioni

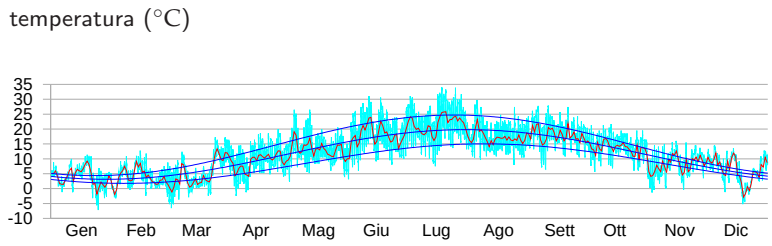


Figura E.16. La temperatura nel corso dell'anno 2006 a Cambridge ha seguito un andamento che è la somma di una variazione sinusoidale annulae compresa tra 3 °C e 20 °C, e una variazione sinusoidale giornaliera fino a 10.3 °C. La temperatura media è stata di 11.5 °C.

giornaliere sia a quelle annuali, usando la stessa legge fisica). Ad una profondità di $2z_0$ le variazioni di temperatura sono un settimo di quelle avvenute alla superficie e sono in ritardo rispetto a queste di un terzo del ciclo (figura E.17). Mentre, ad una profondità di $3z_0$, le variazioni di temperatura non risultano essere che un ventesimo di quelle alla superficie con, in questo caso, un ritardo di mezzo ciclo.

Nel caso di granito solido edi variazioni giornaliere, la dimensione caratteristica ha il valore di $z_0 = 0.16\,\mathrm{m}$. (In questo modo, 32 cm è lo spessore che la roccia deve avere se volete domare le oscillazioni giornaliere della temperatura esterna). Nel caso, invece, di variazioni annuali e sempre di granito solido, il valore della dimensione caratteristica è $z_0 = 3\,\mathrm{m}$.

Concentriamoci sulle variazioni annuali e, successivamente, discuteremo ancora di un paio di cose. Le dimensioni caratteristiche di vari materiali sono riportate nella terza colonna della tabella E.18. Nel caso di terreni sabbiosi umidi o del cemento, il valore della dimensione caratteristica associata z_0 è simile a quella del granito – ovvero, 2.6 m. Nel caso, invece, di terreni secchi o torbosi, il valore di z_0 è più corto – ovvero, circa 1.3 m. Questa è ,forse, una bella notizia perché significa che non si deve scavare troppo in profondità per trovare del terreno che presenta una temperatura stabile. Purtroppo questo fatto lo si deve associare, anche, a qualche cattiva notizia: i flussi naturali sono più piccoli nel caso di terreni secchi.

Il flusso naturale varia durante l'anno e presenta un valore di picco

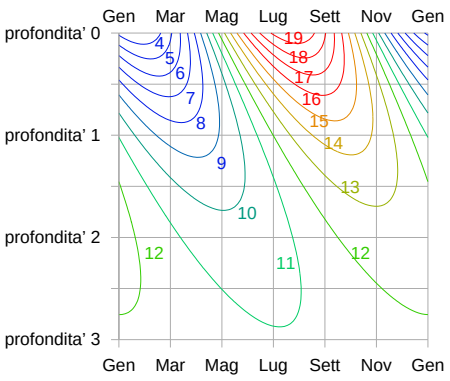


Figura E.17. Temperatura (in °C) in funzione della profondità e del tempo. Le profondità sono riportate come multipli della dimensione caratteristica z_0, che nel caso del granito e di variazioni annuali è 3 m. Alla "profondità 2" (6 m), la temperatura si trova sempre attorno a 11 o 12 °C. Alla "profondità 1" (3 m), questa oscilla tra 8 e 15 °C.

	conducibilità termica κ (W/m/K)	capacità termica C_V (MJ/m^3/K)	dimensione caratteristica z_0 (m)	flusso $A\sqrt{C_V\kappa\omega}$ (W/m^2)
Aria	0.02	0.0012		
Acqua	0.57	4.18	1.2	5.7
Granito solido	2.1	2.3	3.0	8.1
Cemento	1.28	1.94	2.6	5.8
Terreno sabbioso				
secco	0.30	1.28	1.5	2.3
saturato al 50%	1.80	2.12	2.9	7.2
saturato al 100%	2.20	2.96	2.7	9.5
Terreno argilloso				
secco	0.25	1.42	1.3	2.2
saturato al 50%	1.18	2.25	2.3	6.0
saturato al 100%	1.58	3.10	2.3	8.2
Terreno torboso				
secco	0.06	0.58	1.0	0.7
saturato al 50%	0.29	2.31	1.1	3.0
saturato al 100%	0.50	4.02	1.1	5.3

Tabella E.18. Conducibilità termica e capacità termica di vari tipi di materiali e terreni con il valore della caratteristica lunghezza $z_0 = \sqrt{\frac{2\kappa}{C_V\omega}}$ e del flusso di picco $A\sqrt{C_V\kappa\omega}$ associati con le variazioni annuali di temperatura di ampiezza $A = 8.3\,°\mathrm{C}$. I terreni sabbiosi e argillosi hanno una porosità di 0.4; quelli torbosi di 0.8.

(equazione E.9) tanto più piccolo quanto più piccola è la conducibilità.

Nel caso del granito solido, il valore del flusso di picco è $8\,\mathrm{W/m^2}$. Nel caso di terreni secchi, questo varia da $0.7\,\mathrm{W/m^2}$ a $2.3\,\mathrm{W/m^2}$. Mentre in quelli umidi, varia da $3\,\mathrm{W/m^2}$ a $8\,\mathrm{W/m^2}$.

Che cosa significa tutto questo? Vi propongo di considerare, giusto come riferimento, un valore di flusso che stia nel mezzo, ad esempio $5\,\mathrm{W/m^2}$ e che ci aiuti a capire quale valore di potenza potremmo estrarre con una pompa geotermica per unità di area. Se estraiamo un flusso significativamente inferiore a $5\,\mathrm{W/m^2}$, allora, la perturbazione che introduciamo nei flussi naturali presenti sarà piccola. Se, invece, cerchiamo di estrarne uno maggiore di $5\,\mathrm{W/m^2}$, allora, dovremmo aspettarci che la nostra azione altererà significativamente la temperatura del terreno rispetto ai suoi valori naturali e alla lunga potrebbe essere impossibile ottenere ancora questi flussi.

Il valore della densità di popolazione di una tipica zona di periferia urbana inglese corrisponde a $160\,\mathrm{m^2}$ per persona (questo è il caso delle file di case a schiera con circa $400\,\mathrm{m^2}$ per ogni casa, includendo in questo valore anche la superficie dei marciapiedi e delle strade). Con questo valore, possiamo dedurre che, all'incirca, un limite per la potenza trasferita dalla pompa di calore sia

$$5\,\mathrm{W/m^2} \times 160\,\mathrm{m^2} = 800\,\mathrm{W} = 19\,\mathrm{kWh/gg}\ \text{per persona.}$$

Questo valore è troppo vicino, direi in maniera decisamente scomoda, ai livelli di potenza di cui ci piacerebbe disporre in inverno: è ragionevole pensare che le nostre domande di picco in inverno per acqua calda e riscaldamento possano essere di $40\,\mathrm{kWh/gg}$ per persona così come stimato nel caso di casa mia.

Questo calcolo ci suggerisce che in un tipica area suburbana *non tutti possono usare pompe di calore geotermiche*, a meno che facciano attenzione a ripompare indietro del calore durante l'estate.

Facciamo, ora, un secondo tipo di stima, cercando di determinare quanta potenza può essere estratta in maniera continua da una serpentina posta nel terreno ad una profondità di $h = 2\,\mathrm{m}$. Ipotizziamo che si possa abbassare, a livello della serpentina, la temperatura di $\Delta T = 5\,^\circ\mathrm{C}$ rispetto a quella media della superficie del terreno e che quest'ultima rimanga costante. Possiamo, allora, stimare il flusso di calore dalla superficie. Considerando un valore di conducibilità pari a $1.2\,\mathrm{W/m/K}$ (tipico per un suolo argilloso umido),

$$\text{Flusso} = \kappa \times \frac{\Delta T}{h} = 3\,\mathrm{W/m^2}.$$

Se, come sopra, consideriamo una densità di popolazione pari a $160\,\mathrm{m^2}$ per persona, allora la potenza massima per persona che può essere trasportata da una pompa di calore geotermica, nel caso in cui tutto il vicinato ne abbia una in casa, risulta essere $480\,\mathrm{W}$, che corrisponde a $12\,\mathrm{kWh/gg}$ per persona.

In questo modo, ancora una volta, arriviamo alla conclusione che in una tipica zona suburbana, composta da case non isolate molto bene come quella mia, *non tutti possono usare pompe di calore geotermiche* a meno che non dimentichino durante l'estate di rimettere nel terreno del calore. Molto probabilmente le pompe di calore geotermiche non sono adatte in città con alte densità di popolazione.

Per questo motivo, suggerisco le pompe di calore aria-aria come scelta di riscaldamento adatta alla gran parte delle persone.

Inerzia termica

Il fatto di aumentare l'inerzia termica di un edificio aiuta a ridurre le bollette per riscaldamento e il raffrescamento? Questo dipende. La temperatura esterna può variare di circa 10 °C durante il giorno. Un edifico con una grande inerzia termica – ad esempio con muri di pietra spessi – attenuerà naturalmente queste variazioni della temperatura e, senza alcuna azione di riscaldamento o raffrescamento, avremo una temperatura interna vicina alla media di quella esterna. Nel Regno Unito questo tipo di edifici non hanno bisogno di essere riscaldati o raffrescati per molti mesi all'anno. Per contro, un edifico malamente isolato e con un'inerzia termica bassa potrebbe essere giudicato troppo caldo durante il giorno e troppo freddo durante la notte, causando così l'aumento dei costi associati al riscaldamento e al raffrescamento.

Tuttavia una grande inerzia termica non è sempre detto che sia un vantaggio averla. Nell'ipotesi che in inverno, una stanza venga occupata solo per un paio di ore (si pensi, ad esempio, ad una aula per conferenze), il costo energetico per riscaldarla fino a raggiungere una temperatura confortevole sarà tanto maggiore quanto lo è la sua inerzia termica. Questo extra calore investito rimarrà a lungo in quella stanza grazie alla sua grande inerzia termica, ma, se non c'è nessuna persona presente che ne trae vantaggio, è un calore sprecato. Allora, nel caso di stanze poco utilizzate, è più logico avere una struttura con una bassa inerzia termica e riscaldarle rapidamente solo quando richiesto.

Note ed approfondimenti

p.

339 *Tabella E.18.* Fonti: Bonan (2002), `www.hukseflux.com/thermalScience/thermalConductivity.html`

Box E.19. Calcolo del flusso naturale di calore causato da variazioni di temperature sinusoidali alla superficie.

Se si ipotizza che il terreno è composto da un materiale solido omogeneo con conducibilità κ e capacità termica C_V, allora la temperatura alla profondità z al tempo t risponde ai cambi di temperatura alla superficie secondo l'equazione della diffusione

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \frac{\kappa}{C_V}\frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2}. \tag{E.4}$$

Nel caso di un cambio di temperatura che segue una legge sinusoidale con frequenza ω e ampiezza A alla profondità $z = 0$,

$$T(0,t) = T_{\text{superficie}}(t) = T_{\text{media}} + A\cos(\omega t), \tag{E.5}$$

la temperatura risultante alla profondità z e al tempo t, è una funzione decrescente e oscillante

$$T(z,t) = T_{\text{media}} + A\, e^{-z/z_0}\cos(\omega t - z/z_0), \tag{E.6}$$

dove z_0 è la lunghezza caratteristica sia della parte decrescente sia di quella oscillante

$$z_0 = \sqrt{\frac{2\kappa}{C_V\omega}}. \tag{E.7}$$

Il flusso di calore (potenza per unità di superficie) alla profondità z è dato da

$$\kappa\frac{\partial T}{\partial z} = \kappa\frac{A}{z_0}\sqrt{2}e^{-z/z_0}\sin(\omega t - z/z_0 - \pi/4). \tag{E.8}$$

Per esempio, sulla superficie, il flusso di picco è

$$\kappa\frac{A}{z_0}\sqrt{2} = A\sqrt{C_V\kappa\omega}. \tag{E.9}$$

F Onde del mare II

La fisica delle onde in acque profonde

Le onde contengono l'energia in due distinte forme: l'energia potenziale e l'energia cinetica. L'energia potenziale è quella richiesta per spostare tutta l'acqua dalle creste ai ventri; mentre quella cinetica è associata al fatto che l'acqua si sposta.

Qualche volta la gente pensa che quando la cresta di un'onda si sposta attraverso l'oceano a 50 chilometri all'ora, anche l'acqua su quella cresta debba muoversi a quella velocità nella stessa direzione. Ma non è cosi che funziona. In realtà è come nel caso della Ola allo stadio. Quando si propaga sugli spalti, gli esseri umani che la stanno facendo non si stanno muovendo lungo lo stadio: si muovono solo su e giù. Il moto di una quantità di acqua nell'oceano è simile: se si concentrasse l'attenzione su un pezzo di alga in sospensione sull'acqua mentre l'onda passa, si osserverebbe che l'alga si muove su e giù e anche lentamente avanti e indietro rispetto alla direzione del movimento dell'onda – lo stesso medesimo effetto si potrebbe ricreare durante una Ola se le persone si muovessero come i pulitori di finestre quando puliscono una grande vetrina muovendo circolarmente il panno con le mani. L'onda possiede l'energia potenziale grazie al fatto che la cresta è in una posizione più elevata del ventre. E quella cinetica grazie al piccolo movimento circolare su e giù dell'acqua.

Il nostro calcolo approssimato della potenza delle onde dell'oceano richiederà tre ingredienti: una stima del periodo T delle onde (ovvero il tempo tra due creste), una stima dell'altezza h delle onde e la legge fisica che ci dice come calcolare la velocità v dell'onda a partire dal suo periodo.

La lunghezza d'onda λ e il periodo delle onde (ovvero, rispettivamente, la distanza e il tempo tra due creste adiacenti) dipendono dalla velocità del vento che crea le onde, come mostrato in figura F.1. L'altezza delle onde non dipende dalla velocità del vento, dipende piuttosto da quando il vento ha iniziato ad accarezzare in maniera continua la superficie dell'acqua.

Si può stimare il periodo delle onde dell'oceano misurando il tempo tra due onde che si frangono su una spiaggia. Sono ragionevoli 10 secondi? Per quanto riguarda l'altezza delle onde dell'oceano ipotizziamo un'ampiezza di 1 m, il che significa una misura di 2 m dal ventre alla cresta. Penso che questo valore sia maggiore di quello che si misura mediamente, ma potremo rivedere questa stima se decidessimo che è importante. La velocità delle onde in acque profonde è legata al tempo T tra due creste attraverso la legge fisica (si veda Faber (1995), p. 170):

$$v = \frac{gT}{2\pi},$$

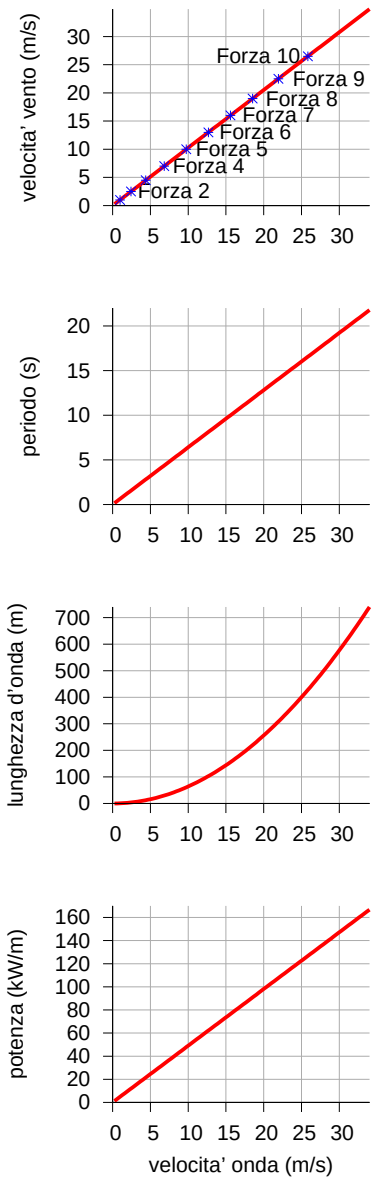


Figura F.1. Fatti inerenti le onde in acque profonde. In tutti e quattro i grafici sull'asse orizzontale è riportata la velocità dell'onda in m/s. Partendo dall'alto verso il basso: velocità del vento (in m/s) richiesta per generare un'onda con una data velocità; periodo (in secondi) di un'onda; lunghezza d'onda (in m) di un'onda; densità di potenza (in kW/m) di un'onda con ampiezza di 1 m.

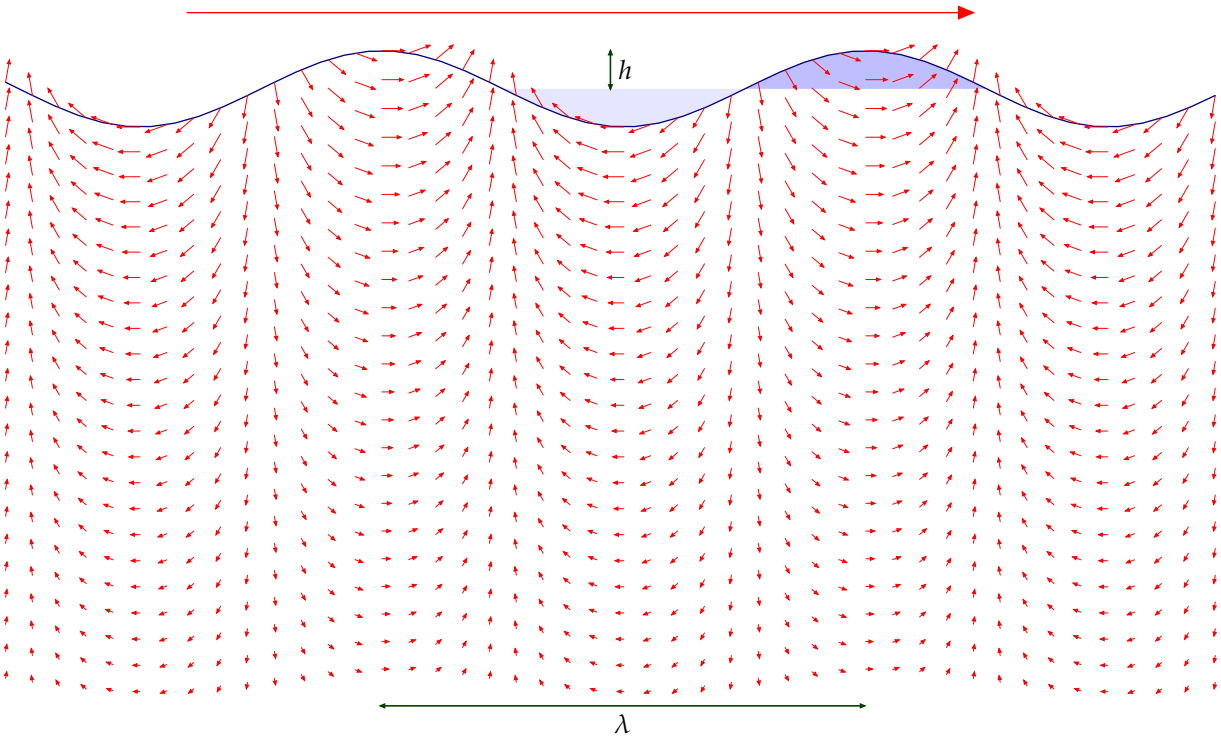


Figura F.2. Un'onda possiede energia sotto due distinte forme: l'energia potenziale associata al crescere dell'acqua dai ventri colorati di chiaro fin su verso le creste colorate di scuro, e l'energia cinetica di tutta l'acqua contenuta in poche lunghezze d'onda della superficie – la velocità dell'acqua è indicata dalle frecce piccole. La velocità dell'onda, da sinistra verso destra, è indicata dalla freccia più grande posta in alto.

dove g è l'accelerazione di gravità ($9.8\,\mathrm{m/s^2}$). Per esempio, se $T = 10$ secondi, allora $v = 16\,\mathrm{m/s}$. La lunghezza d'onda di tale onda – ovvero la distanza tra due creste – risulta essere $\lambda = vT = gT^2/2\pi = 160\,\mathrm{m}$.

Per un'onda di lunghezza d'onda λ e periodo T, se l'altezza di ogni cresta e la profondità di ogni ventre sono rispettivamente $h = 1\,\mathrm{m}$, l'energia potenziale per unità di tempo e per unità di lunghezza è

$$P_{\text{potenziale}} \simeq m^* g\bar{h}/T, \tag{F.1}$$

dove m^* è la massa per unità di lunghezza e corrisponde a circa $\frac{1}{2}\rho h(\lambda/2)$ (questo è vero approssimando l'area della cresta colorata di scuro nella figura F.2 con quella di un triangolo), mentre $\bar{h}$ è il cambiamento in altezza del centro di massa della porzione di acqua spostata in alto ed è circa uguale a h. In questo modo si ottiene

$$P_{\text{potenziale}} \simeq \frac{1}{2}\rho h\frac{\lambda}{2}gh/T. \tag{F.2}$$

(Per calcolare l'energia potenziale nella maniera corretta, avremmo dovuto fare a questo punto un integrale. Il risultato sarebbe stato in ogni caso lo stesso.) Ora, λ/T è semplicemente la velocità v alla quale l'onda viaggia, quindi, si ha che:

$$P_{\text{potenziale}} \simeq \frac{1}{4}\rho g h^2 v. \tag{F.3}$$

Le onde posseggono anche un'energia cinetica, oltre a quella potenziale, ed in maniera sorprendente si può dimostrare che queste due energie hanno esattamente lo stesso valore – ma non riporterò qui di seguito i calcoli necessari. Dunque, la potenza totale delle onde è uguale al doppio della potenza calcolata per l'energia potenziale.

$$P_{\text{totale}} \simeq \frac{1}{2}\rho g h^2 v. \tag{F.4}$$

In questo risultato c'è solo una cosa sbagliata: il valore è troppo grande, perché abbiamo trascurato una strana proprietà concernente la dispersione delle onde: l'energia nelle onde non viaggia alla stessa velocità delle creste, ma ad una velocità particolare, chiamata velocità di gruppo, che in acque profonde corrisponde a *metà* della velocità v. Si può aver conferma del fatto che l'energia viaggia più lentamente delle creste, semplicemente lanciando un sasso in uno stagno ed osservando attentamente come le onde si propagano. Questa osservazione significa che l'equazione F.4 è sbagliata: dobbiamo dividerla per due. La potenza giusta per unità di lunghezza del fronte delle onde risulta, quindi

$$P_{\text{totale}} = \frac{1}{4}\rho g h^2 v. \tag{F.5}$$

Inserendo i valori $v = 16\,\text{m/s}$ e $h = 1\,\text{m}$, troviamo

$$P_{\text{totale}} = \frac{1}{4}\rho g h^2 v = 40\,\text{kW/m}. \tag{F.6}$$

Questa stima approssimata è in accordo con le misure reali fatte nell'Oceano Atlantico (Mollison, 1986). (Si veda p. 82.)

Le perdite dovute alla viscosità sono minime: un'onda con un periodo di 9 secondi dovrebbe fare tre volte il giro della Terra per arrivare a perdere il 10% della sua ampiezza.

Sistemi reali per estrarre potenza dalle onde

Sistemi in acque profonde

Quanto sono efficaci i sistemi reali nell'estrarre potenza dalle onde? Il sistema "Salter Duck" di Stephen Salter ["l'anitra di Salter" in italiano, chiamato così per la sua forma che ricorda il becco di un'anitra. (N.d.T.)] è stato studiato a lungo: una serie di Salter Duck dal diametro di 16 metri e che si nutrono delle onde dell'Oceano Atlantico con una potenza media di 45 kW/m, fornirebbero 19 kW/m alla Scozia Centrale, tenendo conto anche delle perdite dovute alla trasmissione. (Mollison, 1986).

Il sistema Pelamis, ideato dalla società Ocean Power Delivery, ha ormai soppiantato la creazione di Stephen Salter nel ruolo di "macchina per le onde" più usata in acque profonde. Ciascuno di questi dispositivi dalla forma di un serpente, è lungo 130 m ed è composto da una catena di

quattro segmenti, ognuno del diametro di 3.5 m. La sua potenza massima in uscita è di 750 kW. Il sistema Pelamis è progettato per essere ancorato in mari con profondità di 50 m. Un parco che sfrutta il moto ondoso prevede 39 macchine disposte lungo tre linee in maniera da poter essere perpendicolari alla direzione principale delle onde e occupare una superficie dell'oceano di circa 400 m di lunghezza e 2.5 km di larghezza (ovvero un'area di 1 km^2). La sezione effettiva di un singolo sistema Pelamis è 7 m (cioè, nel caso arrivino buone onde buone, riesce ad estrarre il 100% dell'energia che attraversa un fronte lungo 7 m). La società costruttrice dichiara che un parco del genere produrrebbe circa 10 kW/m.

Sistemi in acque poco profonde

Tipicamente il 70% dell'energia delle onde dell'oceano è persa a causa dell'attrito col fondale quando la profondità delle acque diminuisce da 100 m a 15 m. In questa maniera, in acque poco profonde la potenza media estraibile dal moto ondoso per unità di lunghezza della costa viene ridotta a circa 12 kW/m. Il sistema Oyster, sviluppato dalla Queen's University di Belfast e dalla società Aquamarine Power Ltd [`www.aquamarinepower.com`], è uno *spoiler* alto circa 12 m montato sul fondo ed è stato pensato per essere installato in acque con profondità di circa 12 m, dove la potenza media incidente delle onde è maggiore di 15 kW/m. La sua potenza di picco è 600 kW. Un solo dispositivo sarebbe in grado di produrre circa 270 kW con un'altezza delle onde maggiore di 3.5 m. Secondo le previsioni effettuate, il sistema Oyster presenterebbe una potenza per unità di massa maggiore di quella del sistema Pelamis.

Il sistema Oyster potrebbe essere anche usato per far funzionare direttamente delle stazioni di dissalazione a osmosi inversa. "La produzione di picco di acqua potabile da parte di un dissalatore Oyster è compresa tra 2000 e 6000 m^3/gg." Una produzione del genere corrisponde ad un valore equivalente di elettricità pari a 600–2000 kW, se ci si basa sui valori del dissalatore dell'isola di Jersey, che usa 8 kWh per m^3.

G Maree II

Densità di potenza dei bacini che sfruttano il moto delle maree

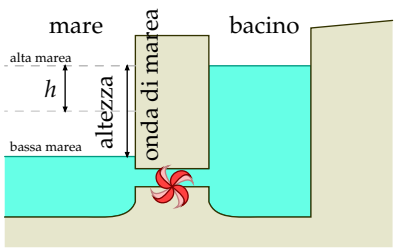


Figura G.1. Sezione di un bacino che sfrutta il moto delle maree. Il bacino è stato riempito durante l'alta marea e ora si trova nel momento di bassa marea. Si fa scorrere l'acqua attraverso le pale di un generatore per convertire l'energia potenziale dell'acqua in elettricità.

Per stimare la potenza di un bacino artificiale che sfrutta il moto delle maree, immaginate che questo sia riempito rapidamente durante l'alta marea e svuotato altrettanto rapidamente durante la bassa marea. La potenza viene estratta durante i due movimenti, sia in quello di riempimento del bacino sia in quello di svuotamento. (Questo metodo è chiamato generazione nei due sensi o generazione a doppio effetto.) L'energia potenziale dell'acqua varia ogni sei ore di un valore pari a mgh, dove h è la variazione in altezza del centro di massa dell'acqua e corrisponde a metà dell'altezza dell'onda di marea. (Quest'ultima corrisponde al dislivello tra bassa e alta marea; figura G.1.) La massa per unità di superficie coperta dal bacino artificiale è $\rho \times (2h)$, dove ρ è la densità dell'acqua ($1000\,\mathrm{kg/m^3}$). In questo modo, la potenza per unità di superficie generata da un bacino per lo sfruttamento del moto delle maree risulta essere

$$\frac{2\rho hgh}{6\,\mathrm{ore}},$$

se si ipotizza di avere dei generatori di elettricità perfettamente efficienti (efficienza di conversione pari al 100%). Inserendo il valore $h = 2\,\mathrm{m}$ (ovvero, considerando un'altezza dell'onda di marea di 4 m), si trova che la potenza per unità di superficie di un bacino risulta essere $3.6\,\mathrm{W/m^2}$. Nell'ipotesi che questa potenza sia convertita in elettricità con un'efficienza del 90%, si ha che

$$\text{potenza per unità di superficie del bacino} \simeq 3\,\mathrm{W/m^2}.$$

Allora, per generare (mediamente) 1 GW di potenza occorre un bacino con una superficie di circa $300\,\mathrm{km^2}$. Un bacino circolare con un diametro di 20 km potrebbe rispondere alla bisogna. (Come termine di paragone, si consideri la superficie dell'estuario del fiume Severn, nel Regno Unito, che verrebbe racchiusa dalla diga proposta, vale a dire circa $550\,\mathrm{km^2}$, oppure quella del bacino che si creerebbe con lo sbarramento della baia di Wash [a nord della regione dell'East Anglia. (N.d.T.)], ossia più di $400\,\mathrm{km^2}$.)

Se un bacino produce elettricità solo quando l'acqua si muove in un senso, la potenza per unità di superficie risulta essere la metà. La densità di potenza media del bacino creato dallo sbarramento dell'estuario del fiume Rance [nel nord della Francia. (N.d.T.)], dove l'altezza media dell'onda di marea è di 10.9 m, è stata misurata nell'arco di alcuni decenni e risulta essere $2.7\,\mathrm{W/m^2}$ (p. 96).

La materia prima dell'energia mareomotrice

Le maree attorno alla Gran Bretagna sono costituite genuinamente da onde di maree. (Lo tsunami, che è chiamato anche "maremoto", non ha niente a che vedere con le maree: è provocato da smottamenti dei fondali e dai terremoti.) L'onda di marea (o più precisamente la cresta di questa onda) si muove molto più velocemente del flusso orizzontale dell'acqua – circa 160 chilometri all'ora contro appena 1.6 chilometri all'ora.

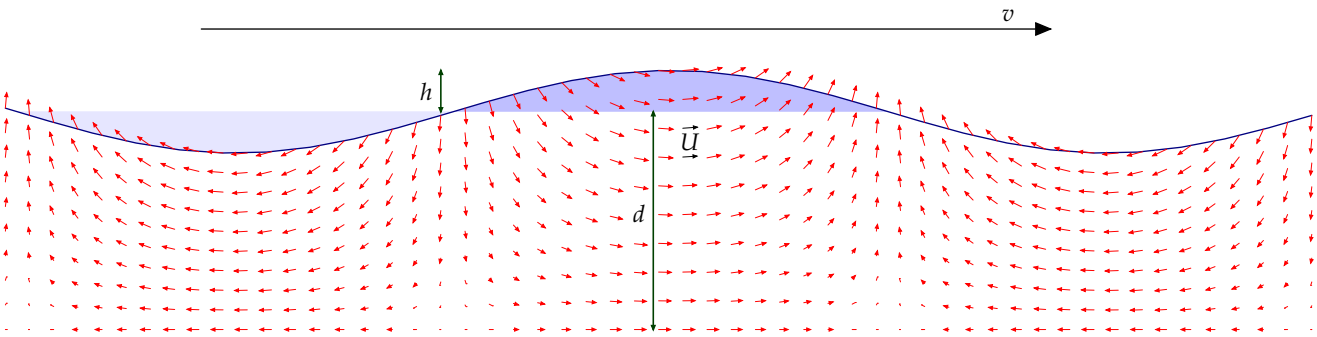


Figura G.2. Onda in acque poco profonde. Come nel caso di quella in acque profonde, l'onda contiene energia sotto due distinte forme: l'energia potenziale associata all'innalzamento dell'acqua dai ventri colorati di chiaro verso le creste colorate di scuro, e l'energia cinetica associata al movimento dell'acqua così come indicato dalle frecce piccole. La velocità dell'onda, da sinistra verso destra, è indicata dalla freccia più grande posta in alto. Nel caso di onde di marea, una profondità tipica potrebbe essere 100 m, la velocità delle cresta 30 m/s, l'ampiezza verticale alla superficie 1 o 2 m, e l'ordine di grandezza della velocità dell'acqua 0.3 o 0.6 m/s.

L'energia che possiamo estrarre dalle maree usando dei bacini o dei parchi mareomotori non può essere mai maggiore di quella associata a queste onde di marea. Possiamo, quindi, stimare la potenza totale delle grandi onde di marea dell'Oceano Atlantico nello stesso modo con cui stimiamo la potenza delle onde marine generate dal vento. Il prossimo paragrafo descrive un modello standard della potenza associata alle onde che si propagano in acque con profondità d, nel caso in cui d risulta essere piccola rispetto alla lunghezza d'onda delle onde stesse (figura G.2). La potenza per unità di lunghezza delle creste delle onde in acque poco profonde è pari a

$$\rho g^{3/2}\sqrt{d}h^2/2. \tag{G.1}$$

La Tabella G.3 mostra la potenza per unità di lunghezza della cresta dell'onda nel caso di numeri plausibili. Se, ad esempio, $d = 100$ m, mentre $h = 1$ m o 2 m, allora, la potenza per unità di lunghezza della cresta dell'onda risulta essere rispettivamente 150 kW/m o 600 kW/m. Questi risultati sono impressionanti paragonati a quelli della potenza lorda per unità di lunghezza delle onde ordinarie dell'Oceano Atlantico in acque profonde, ovvero 40 kW/m (Capitolo F). Le onde ordinarie dell'Atlantico e quelle di marea dello stesso oceano presentano ampiezze verticali comparabili (circa 1 m) ma la potenza lorda associata alle maree è circa 10 volte più grande di quella associata alle onde ordinarie create dal vento.

Taylor (1920) ha elaborato un modello della potenza delle maree molto più preciso che include anche degli importanti dettagli quali l'effetto di Coriolis (prodotto dalla rotazione quotidiana della Terra), l'esistenza di onde di marea che si spostano nella direzione opposta e l'effetto diretto della

Luna sui flussi di energia nel Mare d'Irlanda. Da allora misure sperimentali e simulazioni al computer hanno provato ed esteso l'analisi di Taylor.

Flather (1976) ha costruito un modello numerico per simulare la marea indotta dalla Luna, suddividendo la piattaforma continentale attorno alle Isole Britanniche in circa 1000 celle quadrate. Questo scienziato ha stimato che la potenza totale media che arriva in questa regione è di 215 GW. Secondo questo suo modello 180 GW arrivano dalla striscia di mare che si trova tra la Francia e l'Irlanda. Dall'Irlanda del Nord alle isole Shetland la potenza in ingresso è di 49 GW. Tra le isole Shetland e la Norvegia c'è una perdita netta di 5 GW. Come mostrato in figura G.4, Cartwright et al. (1980) hanno misurato sperimentalmente che la potenza media trasmessa era di 60 GW tra Malin Head (Irlanda) e Florø (Norvegia) e di 190 GW tra Valentia (Irlanda) e la costa della Bretagna vicino a Ouessant (Francia). Si è trovato allora che la potenza in ingresso nel Mar d'Irlanda è pari a 45 GW, mentre quella in ingresso nel Mare del Nord attraverso lo Stretto di Dover è pari a 16.7 GW.

h (m)	$\rho g^{3/2}\sqrt{d}h^2/2$ (kW/m)
0.9	125
1.0	155
1.2	220
1.5	345
1.75	470
2.0	600
2.25	780

Tabella G.3. Flussi di potenza (potenza per unità di lunghezza della cresta dell'onda) nel caso di una profondità $d = 100$ m.

La potenza delle onde di marea

Questo paragrafo che il lettore può anche tranquillamente saltare, fornisce maggiori dettagli riguardo alle leggi fisiche usate in precedenza. Entrerò nei dettagli del modello per la stima della potenza mareomotrice perché la gran parte delle stime ufficiali delle risorse mareomotrici in Gran Bretagna sono state fatte sulla base di un modello che, secondo me, è incorretto.

La figura G.2 mostra un modello semplificato di un'onda di marea che viaggia in acque relativamente poco profonde. Questa rappresentazione che descrive bene, per esempio, le creste delle maree che si muovono verso l'alto lungo il canale della Manica o verso il basso dal Mare del Nord, è una semplificazione della realtà. Risulta fondamentale distinguere la velocità U alla quale l'acqua stessa si muove (e che potrebbe essere di circa 1.6 chilometri all'ora) da quella v alla quale l'alta marea si muove che è tipicamente 160 o 320 chilometri all'ora.

L'acqua ha una profondità d. Le creste e i ventri dell'acqua sono create dal lato sinistro ogni 12 ore a causa delle maree oceaniche. Le creste e i ventri si muovono alla velocità

$$v = \sqrt{gd}. \tag{G.2}$$

Ipotizziamo che la lunghezza d'onda sia molto più grande della profondità e non consideriamo dei dettagli tipo le forze di Coriolis e le variazioni di densità dell'acqua. Chiamiamo h l'ampiezza verticale della marea. Grazie all'ipotesi standard che il flusso sia in regime quasi non turbolento, la velocità orizzontale dell'acqua U rimane quasi costante per una data profondità. Inoltre, sempre tale velocità può essere calcolata grazie alla Legge della conservazione della massa tramite la formula:

$$U = vh/d. \tag{G.3}$$

La velocità dell'onda v diminuisce con la profondità (equazione G.2). Per il momento, assumeremo come ipotesi che la profondità sia costante. L'energia si muove nel tempo da sinistra verso destra secondo una data cadenza. In che modo la potenza mareomotrice totale potrebbe essere stimata? E inoltre, qual è la potenza *massima* che potrebbe essere estratta?

Un metodo possibile consiste nello scegliere una sezione perpendicolare al movimento, nello stimare il *flusso medio dell'energia cinetica* che la attraversa, e nel considerare tale quantità come la potenza che potrebbe essere estratta. Questo metodo, basato sul flusso dell'energia cinetica, è stato usato dai consulenti Black e Veatch per stimare la risorsa mareomotrice nel Regno Unito. Con il nostro modello semplificato, possiamo calcolare la potenza totale in una maniera diversa. Vedremo che il risultato ottenuto usando il flusso dell'energia cinetica è di gran lunga più piccolo.

Il flusso di energia cinetica di picco per ogni sezione è

$$K_{\mathrm{BV}} = \frac{1}{2}\rho A U^3, \tag{G.4}$$

dove A è la superficie della sezione perpendicolare al movimento. (Questa è la legge che descrive il flusso dell'energia cinetica che abbiamo già incontrato nel Capitolo B.)

La reale potenza incidente totale non è uguale a questo flusso di energia cinetica. Per un'onda in acque non profonde, infatti, il calcolo della potenza vera è questione che si risolve guardando le formule riportate in un normale libro di testo di fisica. Una maniera di eseguire tale calcolo consiste nel trovare l'energia totale presente in una lunghezza d'onda e nel dividerla per il periodo. L'energia totale per lunghezza d'onda è la somma dell'energia potenziale e di quella cinetica. Succede, allora, che l'energia cinetica sia identica a quella potenziale. (Questo fatto succede quasi sempre con tutte le cose che oscillano, siano esse masse poste su molle o bambini legati ad un elastico.) In questo modo, per trovare il valore dell'energia totale, tutto quello di cui abbiamo bisogno è calcolare una delle due – l'energia potenziale per lunghezza d'onda o l'energia cinetica per lunghezza d'onda – e poi moltiplicare per due. L'energia potenziale di un'onda (per lunghezza d'onda e per unità di larghezza del fronte delle onde) si trova per integrazione ed è

$$\frac{1}{4}\rho g h^2 \lambda. \tag{G.5}$$

Allora, raddoppiando e dividendo per il periodo, la potenza vera di questo modello che descrive l'onda di marea in acque poco profonde diventa

$$\text{potenza} = \frac{1}{2}(\rho g h^2 \lambda) \times w/T = \frac{1}{2}\rho g h^2 v \times w, \tag{G.6}$$

dove w è la larghezza del fronte delle onde. Sostituendo $v = \sqrt{gd}$,

$$\text{potenza} = \rho g h^2 \sqrt{gd} \times w/2 = \rho g^{3/2} \sqrt{d} h^2 \times w/2. \tag{G.7}$$

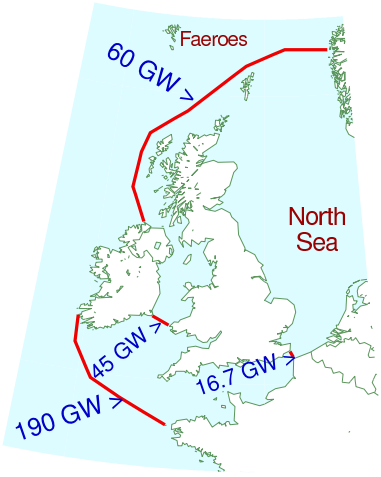


Figura G.4. Potenze mareomotrici medie misurate da Cartwright et al. (1980).

Confrontiamo, ora, questa potenza con il flusso di energia cinetica K_{BV}. In maniera sorprendente, le due espressioni crescono differentemente con l'aumentare della ampiezza h. Usando la relazione di conversione dell'ampiezza (G.3), la velocità di cresta (G.2) e $A = wd$, possiamo riscrivere il flusso dell'energia cinetica come

$$K_{\mathrm{BV}} = \frac{1}{2}\rho A U^3 = \frac{1}{2}\rho w d (vh/d)^3 = \rho \left(g^{3/2}/\sqrt{d}\right) h^3 \times w/2. \tag{G.8}$$

In questo modo il metodo basato sul flusso dell'energia cinetica indica che la potenza totale di un'onda in acque poco profonde aumenta con il *cubo* dell'ampiezza (equazione G.8), invece la formula corretta mostra che lo fa con il *quadrato* della stessa (equazione G.7).

Il rapporto tra flusso di energia cinetica e potenza è

$$\frac{K_{\mathrm{BV}}}{\text{potenza}} = \frac{\rho w \left(g^{3/2}/\sqrt{d}\right) h^3}{\rho g^{3/2} h^2 \sqrt{d} w} = \frac{h}{d}. \tag{G.9}$$

Dal momento che h è generalmente più piccolo di d (h è dell'ordine di 1 m o 2 m, mentre d è dell'ordine di 100 m o 10 m), le stime della potenza mareomotrice basate sul flusso dell'energia cinetica possono essere *molto più piccole*, perlomeno nei casi dove il modello semplificato delle onde di marea in acque poco profonde risulta essere quello appropriato.

Oltretutto, le stime basate sul metodo del flusso dell'energia cinetica portano ad affermare in maniera non corretta che la potenza totale disponibile nel caso di marea sigiziale (marea massima) è otto volte più grande di quella delle quadrature (marea minima), facendo così ipotizzare un rapporto di ampiezza tra le due maree di due a uno; mentre la risposta corretta sarebbe che la potenza totale disponibile di un'onda aumenta con il quadrato della sua ampiezza e quindi il rapporto tra la potenza entrante totale della marea massima e quella della marea minima è di quattro a uno.

Effetto dell'inclinazione del fondale marino e della forza di Coriolis

Se la profondità d diminuisce piano piano e la larghezza rimane costante in modo tale che ci sia una piccola riflessione o un piccolo assorbimento della potenza entrante, allora, la potenza dell'onda resterà costante. Tutto questo significa che il valore $\sqrt{d}h^2$ rimane costante permettendoci di dedurre che l'altezza di un'onda di marea cresce con la profondità proporzionalmente a $h \sim 1/d^{1/4}$.

Si tratta, però, di un modello molto grossolano. Un dettaglio di cui non si tiene conto è l'effetto di Coriolis. Quest'ultimo spinge i ventri e le creste delle onde a virare verso destra – così, ad esempio, si spiega come mai lungo il canale della Manica verso il lato francese le maree alte sono più alte e quelle basse più basse [rispetto al lato inglese. (N.d.T.)]. Non

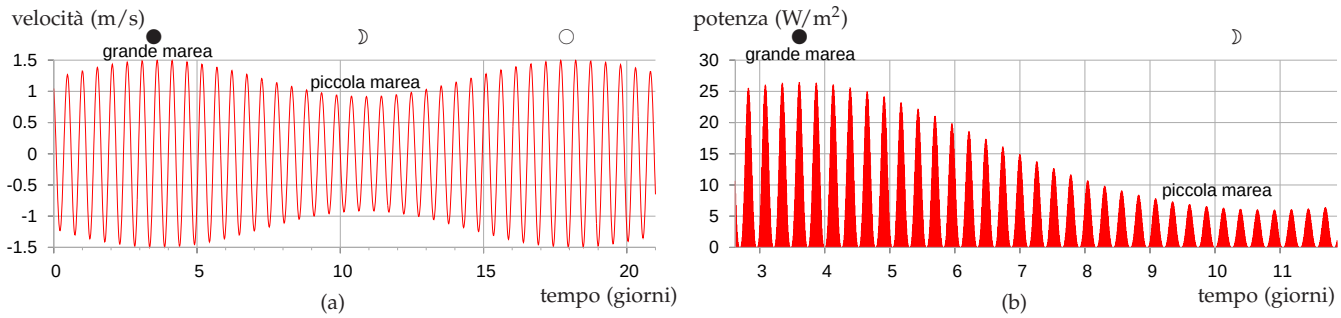


Figura G.5. (a) Corrente della marea su un periodo di 21 giorni nel punto dove le massime correnti sono di 2.9 nodi (1.5 m/s) in corrispondenza della grande marea o marea massima sigiziale e di 1.8 nodi (0.9 m/s) in quella della piccola marea o marea delle quadrature.
(b) La potenza per unità di area del fondale marino su un periodo di nove giorni che si estende tra la grande e la piccola marea. La potenza raggiunge il massimo valore di 27 W/m^2 quattro volte al giorno. La potenza media del parco mareomotore è di 6.4 W/m^2.

tenendo in conto questo effetto potrei aver introdotto qualche errore nelle stime.

Densità di potenza dei parchi mareomotori

Immaginiamo di piantare sul fondale marino dei mulini a vento. Il flusso dell'acqua farà girare le pale. Dal momento che la densità dell'acqua è circa 1000 volte quella dell'aria, allora, se le velocità sono le stesse, la potenza associata al flusso dell'acqua sarà 1000 volte più grande di quello del vento.

Quanta potenza potrebbe estrarre un parco mareomotore [i.e. composto da più impianti mareomotori. (N.d.T.)]? Dipende in maniera cruciale dall'ipotesi che si possa o meno aggiungere i contributi della potenza di differenti centrali mareomotrici poste in aree del fondale *adiacenti*. Nel caso dell'eolico, l'ipotesi di lavoro usata è stata: fino a quando gli aerogeneratori sono posti ad una certa distanza standard gli uni dagli altri, la potenza totale fornita da 10 parchi eolici adiacenti risulta essere la somma delle potenze che ognuno di essi produrrebbe da solo.

Funziona lo stesso per i parchi mareomotori? Oppure, sott'acqua le potenze estratte dalle turbine interferiscono l'una con l'altra in maniera differente? Non credo affatto che esista, in generale, una risposta unica a questa domanda. Possiamo, però, fare due ipotesi alternative ed identificare due casi in cui ognuna di queste ipotesi sembra essere plausibile. La prima ipotesi, secondo cui "la marea è come il vento", fa riferimento al caso in cui possiamo installare gli impianti mareomotori sul fondale marino, distanziati tra loro ad un distanza cinque volte superiore al diametro delle turbine stesse e senza che vi siano interferenze tra queste per tutta la zona del fondale marino che si decide di coprire.

La seconda ipotesi, invece, secondo cui "possiamo avere solo una lunga fila", permette di dire che la potenza massima estraibile in una data regione è la potenza che potrebbe essere fornita da un'*unica* fila di turbine rivolte verso il flusso. Il caso in cui questa ipotesi risulta corretta è quello speciale di una diga idroelettrica: se l'acqua dalla diga passa attraverso un'unica turbina correttamente progettata, allora non ha senso installarne

altre dopo di quella. Non potete ricavare 100 volte più energia installandone altre 99 dopo la prima. Tutta l'energia è estratta dalla prima e dopo non ce n'è più per le altre. L'ipotesi "possiamo avere solo una lunga fila" è, quindi, quella giusta quando si tratta di stimare la potenza estraibile in un posto dove l'acqua scorre attraverso un canale stretto passando da un invaso posto ad una certa altezza, dove se ne sta quasi immobile, ad un altro invaso, posto ad un'altezza inferiore. (Questo caso è stato studiato da Garrett and Cummins (2005, 2007).)

Scopro subito le mie carte al lettore ed affermo che, a mio parere, in molti luoghi attorno alle Isole Britanniche l'ipotesi "la marea è come il vento" è una buona approssimazione. Forse alcune zone presentano le caratteristiche di un canale stretto. In questi luoghi le mie stime potrebbero essere eccessive.

Ipotizziamo che le regole per costruire parchi mareomotori sottomarini siano simili a quelle dei parchi eolici e che l'efficienza di questi sia uguale a quella dei migliori parchi eolici, ovvero circa 1/2. Allora, possiamo prendere in prestito l'equazione che descrive la potenza di un parco eolico (per unità di area di superficie) da p. 295. La potenza per unità di area di superficie del fondale marino è

$$\frac{\text{potenza per parco mareomotore}}{\text{area parco mareomotore}} = \frac{\pi}{200}\frac{1}{2}\rho U^3. \qquad \text{(G.10)}$$

Utilizzando questa equazione, la Tabella G.6 mostra la potenza per alcune correnti di marea.

U (m/s)	U (nodi)	potenza parco mareomotore (W/m^2)
0.5	1	1
1	2	8
2	4	60
3	6	200
4	8	500
5	10	1000

Tabella G.6. Densità di potenza di un parco sottomarino mareomotore (in watt per metro quadrato di fondale marino) come funzione della velocità di flusso U. (1 nodo = 1 miglio nautico all'ora = 0.514 m/s.) La densità di potenza è calcolata usando la formula $\frac{\pi}{200}\frac{1}{2}\rho U^3$ (equazione G.10).

Quali sono, allora, i valori medi delle correnti delle maree? Le carte delle maree forniscono generalmente le correnti associate a quelle con la più grande escursione (chiamate grandi maree o maree sigiziali) e a quelle con la più piccola (chiamate maree minime o maree delle quadrature o piccole maree). La grande marea si manifesta appena dopo ogni luna piena e ogni luna nuova, mentre quella minima subito dopo il primo e il terzo quarto di luna. La potenza di un parco mareomotore varierebbe lungo tutta la giornata in maniera completamente prevedibile. La Figura G.5 illustra la variazione di densità di potenza di un parco mareomotore con una corrente massima di 1.5 m/s. In questo caso la densità di potenza media sarebbe di 6.4 W/m^2. Ci sono molti luoghi attorno alle Isole Britanniche dove la potenza per unità di area potrebbe essere di 6 W/m^2 o superiore. Questa stima è simile ai valori che avevamo calcolato per i parchi eolici (2–3 W/m^2) e quelli fotovoltaici (5–10 W/m^2).

Applicheremo ora la teoria secondo la quale "i parchi mareomotori sono come quelli eolici" per stimare la potenza estraibile dalle correnti delle maree nelle regioni promettenti attorno alle Isole Britanniche. Come contro prova, calcoleremo anche la potenza mareomotrice totale per ognuna di queste regioni usando la teoria "della potenza delle onde di maree", al fine di verificare che la potenza stimata per i parchi mareomotori non sia

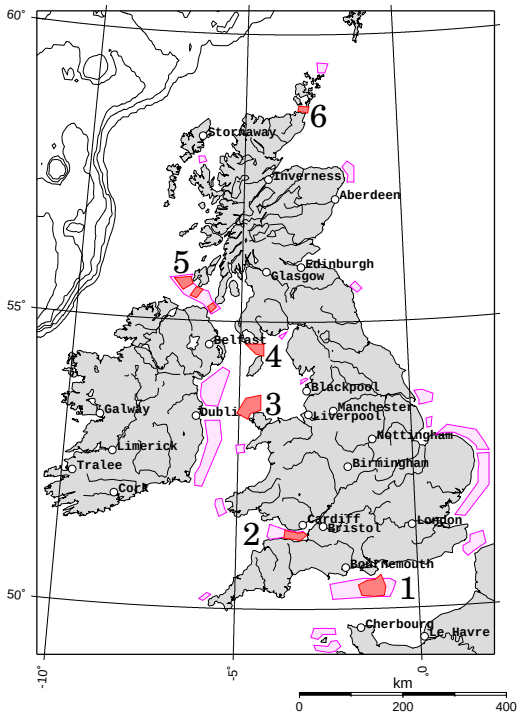


Figura G.7. Regioni attorno alle Isole Britanniche dove i flussi di marea di picco sono superiori a 1 m/s. Le sei regioni colorate di scuro sono riportate nella Tabella G.8:

1. il canale della Manica (a sud dell'isola di Wight);
2. Il canale di Bristol;
3. a nord di Anglesey;
4. a nord dell'isola di Man;
5. tra l'Irlanda del Nord, il Mull of Kintyre e Islay;
6. lo stretto di Pentland Firth (tra le Orcadi e la Scozia), e tra le isole Orcadi.

Ci sono delle enormi correnti anche attorno alle isole lungo il canale della Manica ma non ricadono sotto la sovranità del Regno Unito. A seguire, le altre regioni sono il Mare del Nord dal Tamigi (Londra) al Wash (Kings Lynn).
I contorni mostrano le acque con profondità superiori a 100 m.
I dati sulle maree sono tratti dal Reed's Nautical Almanac e dal DTI Atlas of UK Marine Renewable Energy Resources (2004).

superiore a quella totale disponibile. I posti attorno alle Isole Britanniche dove le correnti di marea sono grandi vengono mostrati in figura G.7.

Ho stimato, dando un'occhiata alle carte delle maree riportate sul *Reed's Nautical Almanac*, il valore di riferimento della potenza nelle sei regioni con grandi correnti. (Queste stime potrebbero facilmente presentare un margine di errore del 30%.) Ma ho sovrastimato o sottostimato l'area di ogni regione? Di sicuro non sono andato di persona a misurare il fondale marino e quindi non so se qualche regione potrebbe essere non adatta per

Regione	U (nodi) N	U (nodi) S	densità di potenza (W/m^2)	area (km^2)	potenza media (kWh/gg/p)	d (m)	w (km)	potenza lorda N (kWh/gg/p)	potenza lorda S (kWh/gg/p)
1	1.7	3.1	7	400	1.1	30	30	2.3	7.8
2	1.8	3.2	8	350	1.1	30	17	1.5	4.7
3	1.3	2.3	2.9	1000	1.2	50	30	3.0	9.3
4	1.7	3.4	9	400	1.4	30	20	1.5	6.3
5	1.7	3.1	7	300	0.8	40	10	1.2	4.0
6	5.0	9.0	170	50	3.5	70	10	24	78
Total					**9**				
			(a)					(b)	

Tabella G.8. (a) Potenza associata alle maree nell'ipotesi che i parchi sottomarini siano simili ai parchi eolici. La densità di potenza è la potenza media per unità di superficie del fondale marino. Le sei regioni sono riportate in figura G.7. N = piccola marea [*Neaps*, in inglese. (N.d.T.)]. S = grande marea [*Springs*, in inglese. (N.d.T.)].
(b) La tabella riporta a titolo di paragone la potenza entrante lorda stimata usando l'equazione G.1 (p. 348).

v (m/s)	v (nodi)	densità potenza attrito (W/m^2) $R_1 = 0.01$	$R_1 = 0.003$	densità di potenza parco mareomotore (W/m^2)
0.5	1	1.25	0.4	1
1	2	10	3	8
2	4	80	24	60
3	6	270	80	200
4	8	640	190	500
5	10	1250	375	1000

Tabella G.9. Densità di potenza di attrito $R_1\rho U^3$ (in watt per metro quadrato di fondale marino) come funzione della velocità di flusso, nell'ipotesi che $R_1 = 0.01$ e $R_1 = 0.003$. Flather (1976) usa come valori $R_1 = 0.0025$–0.003, Taylor (1920), invece, 0.002. (1 nodo = 1 miglio nautico all'ora = 0.514 m/s). La colonna finale a destra riporta la stima della potenza di un parco mareomotore come da tabella G.6. Per ulteriori approfondimenti si veda Kowalik (2004) e Sleath (1984).

qualche motivo – troppo profonda, troppo poco profonda o semplicemente troppo complicata per costruirci qualcosa sopra.

Ammesso e concesso che siano valide tutte queste incertezze, sono comunque arrivato a stimare una potenza totale ricavabile da parchi mareomotori sottomarini pari a 9 kWh/gg per persona. Questo risultato corrisponde al 9% della potenza entrante lorda menzionata a p. 92, ossia 100 kWh al giorno per persona. (L'estrazione di 1.1 kWh/gg/p nel canale di Bristol, corrispondente alla regione 2, potrebbe entrare in conflitto con la generazione di potenza della diga sul fiume Severn; dal momento che la presenza del parco mareomotore potrebbe comportare un *aumento* oppure una *sostituzione* dell'attrito che viene naturalmente creato dal canale.)

Stima della risorsa mareomotrice attraverso il calcolo dell'attrito generato sul fondo

Un altro modo di stimare la potenza ottenibile dalle maree è quello di calcolare quanta potenza viene già dissipata per attrito con il fondale marino. Uno strato di turbine posizionate appena sopra il fondale potrebbe fornire una buona stima, dal momento che esercita verso l'acqua lo stesso attrito del fondale naturale su cui questa normalmente scorre, e poiché estrae in questo modo la stessa quantità di potenza che l'attrito in genere dissipa, senza alterare in modo significativo i flussi delle maree.

Allora, quanto vale la potenza dissipata "dall'attrito generato sul fondo"? Sfortunatamente non esiste un modello semplice che descriva questo fenomeno. Dipende dalla ruvidezza del fondale marino e dal materiale di cui è composto – e anche avendo queste informazioni, la ricerca di una formula corretta da usare non sarebbe finita. Un modello molto usato dice che l'ordine di grandezza dello sforzo (misurato come forza per unità di area) è $R_1\rho U^2$, dove U è la velocità media del flusso e R_1 è una quantità adimensionale chiamata coefficiente di attrito di taglio. Possiamo stimare la potenza dissipata per unità di area moltiplicando lo sforzo per la velocità. La Tabella G.9 mostra la potenza dissipata in attrito, $R_1\rho U^3$, nell'ipotesi di $R_1 = 0.01$ e $R_1 = 0.003$. Per valori del coefficiente di attrito di taglio

compresi in questo intervallo, la potenza di attrito è molto simile a quella stimata per un parco mareomotore. Questa è una buona notizia, perché significa che il fatto di aver piantato sul fondale marino un foresta di turbine distanziate tra loro cinque volte il loro diametro non modificherà in maniera significativa il flusso. L'attrito che esiste naturalmente ha un effetto che è dello stesso ordine di grandezza.

Bacini che sfruttano le maree usando delle pompe

"L'uso astuto di pompe" aumenta artificialmente l'ampiezza delle maree in un bacino e, di conseguenza, ne aumenta la potenza ottenuta. Il costo energetico di pompare *dentro* dell'acqua in più in corrispondenza dell'alta marea viene ripagato con gli interessi quando la stessa acqua viene lasciata andare *fuori* in corrispondenza della bassa marea e successivamente rimessa dentro di nuovo con l'alta marea. "L'uso astuto di pompe" è usato a La Rance in Francia, ottenendo in questa maniera un aumento netto di potenza di circa il 10% (Wilson and Balls, 1990). Cerchiamo di capire il limite teorico di questa soluzione tecnologica. Suppongo, per fare questo, che la generazione presenti un'efficienza $\epsilon_g = 0.9$, mentre il pompaggio una $\epsilon_p = 0.85$, e che l'altezza dell'onda di marea sia $2h$. Inoltre, ipotizzo che il prezzo di acquisto e vendita dell'elettricità rimanga lo stesso indipendentemente dall'ora, in maniera che l'altezza ottimale di elevazione b, alla quale il bacino viene portato rispetto all'alta marea, sia ricavabile uguagliando il costo marginale del pompaggio supplementare al ritorno marginale legato all'acqua aggiunta, ossia sia data da:

$$b/\epsilon_p = \epsilon_g(b + 2h).$$

Definendo l'efficienza totale legata al movimento di andata e ritorno $\epsilon = \epsilon_g\epsilon_p$, si ha

$$b = 2h\frac{\epsilon}{1-\epsilon}.$$

Per esempio, con un'altezza di onda di marea pari a $2h = 4\,\mathrm{m}$ e un'efficienza totale di andata e ritorno $\epsilon = 76\%$, l'altezza ottimale di elevazione è $b = 13\,\mathrm{m}$. Questo valore rappresenta la massima altezza alla quale il pompaggio può essere giustificato, se il prezzo dell'elettricità rimane costante.

Ipotizzo ora di usare la stessa astuzia quando c'è bassa marea. (Questo fatto richiede che il bacino abbia uno sviluppo verticale di 30 m!) La potenza prodotta per unità di area è quindi

$$\left(\frac{1}{2}\rho g\epsilon_g(b+2h)^2 - \frac{1}{2}\rho g\frac{1}{\epsilon_p}b^2\right)\Big/\, T,$$

dove T è il tempo che intercorre tra l'alta e la bassa marea. Possiamo esprimere questo come la densità massima possibile di potenza senza

ampiezza di marea (mezzo ciclo) h (m)	altezza ottimale di elevazione b (m)	potenza con pompaggio (W/m^2)	potenza senza pompaggio (W/m^2)
1.0	6.5	3.5	0.8
2.0	13	14	3.3
3.0	20	31	7.4
4.0	26	56	13

Tabella G.10. Densità teorica di potenza da maree con uso astuto di pompe senza limitazione dell'altezza delle pareti del bacino.

ampiezza marea (mezzo ciclo) h (m)	altezza elevazione b (m)	potenza con pompaggio (W/m^2)	potenza senza pompaggio (W/m^2)
1.0	1.0	1.6	0.8
2.0	2.0	6.3	3.3
3.0	3.0	14	7.4
4.0	4.0	25	13

Tabella G.11. Densità di potenza con uso astuto di pompe, nell'ipotesi che l'altezza di elevazione sia pari a quella dell'ampiezza di marea. Questa ipotesi funziona se, per esempio, al momento della marea minima, il pompaggio riporta all'altezza dell'onda di marea della grande marea.

pompaggio, $\epsilon_g 2\rho g h^2/T$, amplificata di un fattore

$$\left(\frac{1}{1-\epsilon}\right),$$

che è circa 4. La Tabella G.10 mostra la densità teorica di potenza che il pompaggio potrebbe fornire. Sfortunatamente quest'astuzia sarà raramente utilizzata appieno a causa delle considerazioni economiche legate alla costruzione del bacino: il pieno sfruttamento del pompaggio incrementa la produzione di potenza di quattro volte e richiede che l'altezza delle pareti del bacino sia circa 4 volte l'altezza dell'onda di marea. Ma la quantità di materiale necessario per un muro di altezza H aumenta con H^2, facendo sì che il costo della costruzione di un muro quattro volte più alto, non sarà quattro volte maggiore, ma ben di più. Il denaro che avanza sarebbe meglio spenderlo per allargare il bacino orizzontalmente piuttosto che verticalmente.

L'uso astuto di pompe può essere in ogni caso implementato senza costi nei giorni in cui l'altezza dell'onda di marea risulta essere inferiore al valore massimo: il livello dell'acqua in fase di alta marea può essere innalzato al suo valore massimo. La tabella G.11 riporta la potenza generata quando l'altezza di elevazione è fissata al valore h, ovvero l'altezza del bacino è appena il doppio di quella esterna. Nel momento di marea minima il raddoppio dell'estensione verticale è cosa facile, dal momento che le maree minime sono alte la metà di quelle massime. L'uso di pompe per raggiungere il livello delle maree massime, permetterebbe alle maree minime di fornire circa il doppio di potenza rispetto al caso senza pompag-

Figura G.12. Diverse modalità di uso astuto di pompe. Due bacini sono situati a livello del mare. (a) Un modo semplice di usare i due bacini è di nominarli uno "bacino alto" e l'altro "bacino basso"; quando il livello del mare circostante è vicino a quello di alta marea, si fa entrare l'acqua nel bacino alto o la si pompa attivamente (usando elettricità da altre fonti); analogamente, quando il livello del mare è vicino a quello di bassa marea, si svuota il bacino basso, in maniera passiva o attraverso il pompaggio meccanico; quindi, ogniqualvolta la potenza viene richiesta, la si genera lasciando scorrere l'acqua dal bacino alto a quello basso. (b) Un'altra soluzione che potrebbe produrre maggiore potenza per unità di area non prevede alcun flusso di acqua tra i due bacini. Mentre uno dei due viene completamente riempito o svuotato, l'altro può fornire potenza in maniera continua alla rete elettrica in base alla domanda. Il pompaggio potrebbe essere alimentato da fonti intermittenti quali l'eolico, dalla potenza in sovrappiù della rete elettrica (si veda, ad esempio, quella generata dalle centrali nucleari), oppure dall'altra metà dell'impianto, usando la potenza di un bacino per pompare l'acqua dell'altro su e giù.

gio. In questa maniera il sistema con pompaggio presenterebbe variazioni bisettimanali di potenza di un fattore 2 invece che di un fattore 4.

Ottenere potenza mareomotrice "in continuazione" usando due bacini

Ecco un'idea pulita: avere a disposizione due bacini, uno detto "pieno" e uno detto "vuoto". Ad ogni alta marea il bacino pieno viene riempito; ad ogni bassa marea il bacino vuoto viene svuotato. Queste operazioni di riempimento e di svuotamento potrebbero essere fatte sia in maniera passiva attraverso delle chiuse, sia in maniera attiva utilizzando delle pompe (in modo astuto come presentato in precedenza). Ogniqualvolta la potenza viene richiesta, l'acqua viene lasciata scorrere dal bacino pieno a quello vuoto, o (detto meglio in termini di potenza) tra uno dei due bacini e il mare. Il costo in conto capitale dello schema a doppio bacino potrebbe essere maggiore, dal momento che si ha bisogno di pareti aggiuntive; il grande vantaggio è che la potenza risulta sempre disponibile in modo che la generazione può seguire la domanda.

Possiamo usare la potenza generata dal bacino vuoto per pompare l'acqua nel bacino pieno al momento dell'alta marea e, in maniera simile, usare la potenza generata da quello pieno per aspirare via l'acqua dall'altro al momento della bassa marea. Questo pompaggio auto-prodotto aumenterebbe la potenza totale fornita dall'impianto, senza che vi sia necessità di comprare energia dalla rete elettrica. Una bella caratteristica della soluzione a due bacini è che il momento ottimale per *pompare* l'acqua nel bacino alto corrisponde all'alta marea, vale a dire quando è anche il momento ottimale per *generare* potenza dal bacino basso. In maniera del tutto simile, la bassa marea è il momento perfetto per pompare via l'acqua dal bacino basso e allo stesso tempo per generare potenza da quello alto. Nel corso di una semplice simulazione, ho trovato che il sistema a due bacini, posto in un luogo con un'altezza dell'onda di marea di 4 m, con un'appropriata programmazione per il pompaggio, è in grado di fornire *in maniera continua* una potenza di 4.5 W/m^2 (MacKay, 2007a). In questo caso il livello dell'acqua di un bacino viene sempre tenuto sopra il livello medio del mare, mentre l'altro sempre sotto. Questa densità di potenza di 4.5 W/m^2 è più grande del 50% della densità di potenza media massima possibile in un impianto con un solo bacino nello stesso posto (3 W/m^2). La potenza

disponibile in maniera continua dal sistema a due bacini sarebbe maggiore di quella di uno ordinario a bacino singolo, che è altresì meno flessibile e di natura intermittente. Inoltre, il sistema a due bacini potrebbe funzionare come impianto di immagazzinamento di energia attraverso il pompaggio.

Note ed approfondimenti

p.

347 *Efficienza del 90%...* Le turbine sono efficienti al 90% nel caso di prevalenze geodetiche di 3.7 m o maggiori. Baker et al. (2006).

358 *Ottenere potenza mareomotrice "in continuazione" usando due bacini.* Esiste una centrale mareomotrice a due bacini in Cina ad Haishan, vicino all'isola di Maoyan. Un unico generatore posto tra i due bacini, come mostrato in figura G.12(a), produce potenza in maniera continua e genera in media 39 kW. [2bqapk].

Ulteriori approfondimenti: Shaw and Watson (2003b); Blunden and Bahaj (2007); Charlier (2003a,b).
Per quanto riguarda l'attrito dei fondali e la variazione di flusso rispetto alla profondità si veda Sleath (1984).
Per maggiori informazioni sulla stima della risorsa mareomotrice nel Regno Unito si veda MacKay (2007b).
Per saperne di piu sulle lagune usate come bacini mareomotori, si veda MacKay (2007a).

H Roba varia II

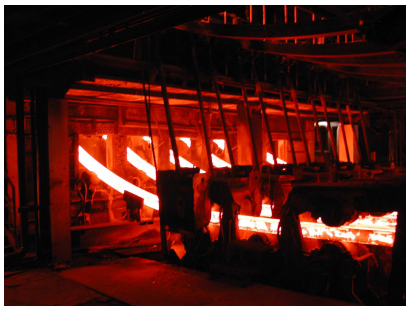


Figura H.1. Colata continua di acciaio nell'altoforno della società Korea Iron and Steel Company.

Energia importata

Dieter Helm e i suoi colleghi hanno stimato l'impronta di carbonio per ogni oggetto del valore di una sterlina importato nel Regno Unito da un Paese X usando il valore medio dell'intensità di carbonio dell'economia dello stesso Paese X (ovvero, il rapporto tra le sue emissioni di carbonio e il suo prodotto interno lordo). Da questo studio hanno concluso che il carbonio contenuto negli oggetti importati in Gran Bretagna (che dovrebbe, verosimilmente, essere aggiunto alle stime ufficiali dell'impronta di carbonio stimata in 11 tonnellate di CO_2e all'anno per persona) ammonta a circa 16 tonnellate di CO_2e all'anno per persona. Uno studio successivo, più dettagliato e commissionato da DEFRA [il Ministero dell'Agricoltura inglese. (N.d.T.)] ha stimato che il contenuto di carbonio è un quantitativo inferiore ma ancora molto importante: circa 6.2 tonnellate di CO_2e all'anno per persona. In termini di energia 6 tonnellate di CO_2e all'anno equivale a qualcosa come 60 kWh/gg.

In questo capitolo proveremo a vedere se possiamo ritrovare queste stesse conclusioni in maniera differente, ovvero facendo riferimento al peso dei prodotti importati.

La Figura H.2 mostra i prodotti importati in Gran Bretagna nell'anno 2006 raggruppati secondo tre modalità. A sinistra, il *valore* totale in sterline delle importazioni viene suddiviso per Paese di origine. Al centro, lo stesso valore totale è suddiviso per tipologia di roba varia importata, facendo riferimento alla classificazione di HM Revenue and Customs [l'ente nazionale inglese per la riscossione delle tasse. (N.d.T.)]. A destra, tutte le importazioni ricevute via mare sono presentate a seconda del loro *peso* e suddivise secondo la classificazione usata dal Ministero dei Trasporti, che non considera importante il fatto che qualche cosa sia cuoio o tabacco - le uniche informazioni sulle merci importate di cui si tiene traccia sono: quanto sono pesanti, se sono liquide o solide e se sono arrivate in un container oppure alla rinfusa.

Il costo energetico dei combustibili importati (in alto a destra) *è* tenuto in conto nei calcoli del consumo energetico britannico, mentre quello di tutte le altre merci non lo è. Per la maggior parte dei materiali, l'energia contenuta per unità di peso risulta essere uguale o anche più grande di 10 kWh al kg – ovvero lo stesso valore dei combustibili fossili. Questo fatto è vero, per esempio, per tutti i metalli e le leghe, tutti i polimeri e i materiali compositi, la gran parte dei prodotti cartacei e per molti materiali ceramici. Le eccezioni sono: i materiali grezzi come i minerali; i materiali ceramici porosi come il cemento, i mattoni e la porcellana, il cui contenuto energetico è dieci volte inferiore; il legname e alcune gomme; ed infine il vetro, il cui costo energetico è un pelino meno di 10 kWh al kg. [r22oz]

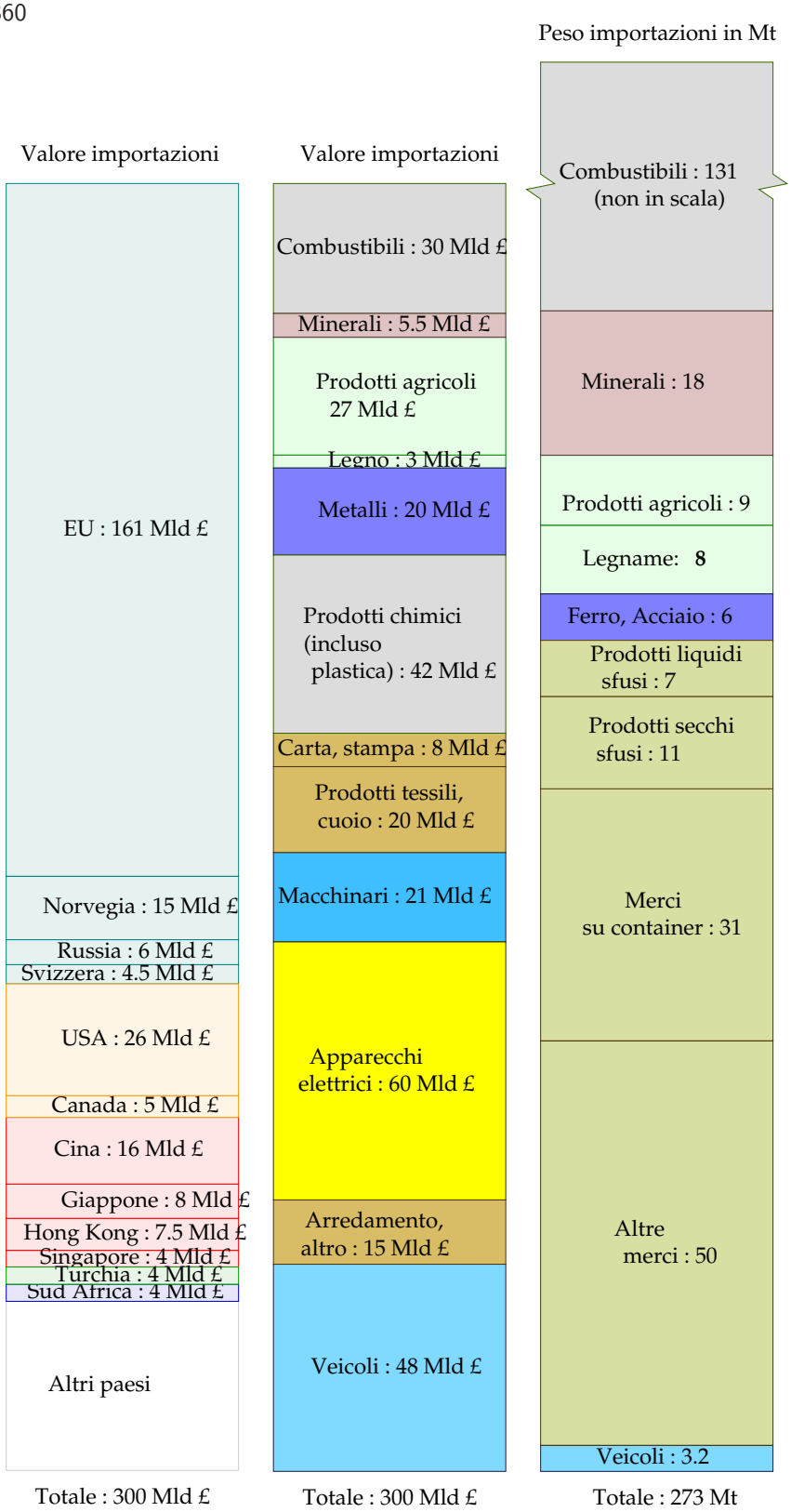


Figura H.2. Importazioni di roba varia nel Regno Unito nell'anno 2006 .

È possibile, allora, stimare in maniera approssimata l'impronta energetica delle importazioni inglesi semplicemente riferendosi ai materiali di cui sono fabbricati, ad eccezione dei minerali grezzi e del legname. A causa della grossolanità dei dati a disposizione, sicuramente scapperà inavvertitamente qualche cosa fatta di legno o di vetro, anche se si spera che questa imprecisione venga bilanciata dalla sottostima del contenuto energetico della maggior parte dei metalli, delle plastiche e degli oggetti più complessi, molti dei quali non hanno un'energia immagazzinata di 10 kWh al kg ma di 30 kWh al kg e oltre.

Per questa stima prenderò dalla colonna di destra della figura H.2 i prodotti di ferro e acciaio, i prodotti secchi sfusi, le merci trasportate in container e la categoria "Altre merci" per un totale di 98 milioni di tonnellate all'anno. Per il momento lascerò da parte la voce "Veicoli". Sottraendo dalla somma il valore stimato di 25 milioni di tonnellate di cibo, che presumibilmente è inglobato nella voce "Altre merci" (34 milioni di tonnellate di cibo sono state importate nel 2006), trovo 73 milioni di tonnellate.

Convertendo questo valore in energia usando il fattore suggerito prima e dividendolo per 60 milioni di persone, possiamo stimare che le merci importate hanno un energia immagazzinata di 33 kWh/gg per persona.

Per quanto riguarda le automobili, grazie al fatto che ne sappiamo un po' di più, possiamo essere più precisi: nel 2006 il numero di veicoli importati è stato di 2.4 milioni. Se prendiamo per buono il valore di di 76 000 kWh come l'energia immagazzinata da un'auto (un numero che abbiamo scelto a pagina p. 100), allora tutte queste auto importate hanno un'energia immagazzinata di 8 kWh/gg per persona.

Ho lasciato fuori dal conto la voce "Prodotti liquidi" perché non sono sicuro di quale sorta di materiali siano. Se sono davvero liquidi di prodotti chimici, allora il loro peso potrebbe essere significativo.

Siamo arrivati, quindi, ad un stima totale di 41 kWh/gg per persona legata all'energia immagazzinata dalle merci importate – certamente lo stesso ordine di grandezza di quella trovata da Dieter Helm e dai suoi colleghi.

Ho il sospetto che questo valore di 41 kWh/gg per persona possa essere un stima bassa, perché l'intensità energetica che abbiamo ipotizzato (10 kWh al kg) è molto bassa per tutti quei manufatti come i macchinari o gli apparecchi elettrici. In ogni caso non conoscendo i pesi di tutti i tipi differenti di merci importate, questa è la migliore stima che posso fare al momento.

Figura H.3. Miniera a cielo aperto per l'estrazione di niobio in Brasile.

Analisi del ciclo di vita degli edifici

Le Tabelle H.4 e H.5 riportano le stime del *fabbisogno energetico di processo* associato ai materiali da costruzione e agli edifici. I valori includono l'energia usata per trasportare le materia prima alla fabbrica ma non quella necessaria per trasportare il prodotto finito fino al cantiere.

Materiale	Energia immagazzinata (MJ/kg)	(kWh/kg)
Legno dolce segato ed essiccato in forno	3.4	0.94
Legno duro segato ed essiccato in forno	2.0	0.56
Legno duro segato ed essiccato all'aria	0.5	0.14
Pannello duro di legno	24.2	6.7
Pannello di truciolato di legno	8.0	2.2
Pannello di fibre di legno di densità media	11.3	3.1
Pannello di compensato	10.4	2.9
Legno lamellare incollato	11	3.0
Legno impiallacciato/laminato	11	3.0
Paglia	0.24	0.07
Terra cruda	0.7	0.19
Granito da taglio importato	13.9	3.9
Granito da taglio locale	5.9	1.6
Intonaco di gesso	2.9	0.8
Pannello in cartongesso	4.4	1.2
Pannello in Fibro Cemento	4.8	1.3
Cemento	5.6	1.6
Calcestruzzo gettato in opera	1.9	0.53
Prefabbricato in calcestruzzo stagionato a vapore	2.0	0.56
Prefabbricato in calcestruzzo con sistema Tilt-up	1.9	0.53
Mattone di argilla	2.5	0.69
Blocco di calcestruzzo	1.5	0.42
Calcestruzzo aerato autoclavato	3.6	1.0
Plastica – generale	90	25
PVC	80	22
Gomma sintetica	110	30
Pittura acrilica	61.5	17
Vetro	12.7	3.5
Fibra di vetro (lana di vetro)	28	7.8
Alluminio	170	47
Rame	100	28
Acciaio zincato	38	10.6
Acciaio inossidabile	51.5	14.3

Tabella H.4. Energia immagazzinata nei materiali da costruzione (nell'ipotesi in cui si usino per il prodotto finale delle materie prime non riciclate).
(La pietra da taglio è una pietra naturale o una roccia che è stata scelta e tagliata secondo una data forma e dimensione.)
Fonti: [3kmcks], Lawson (1996).

Tabella H.5. Energia immagazzinata in vari tipi di pareti, pavimenti e soffitti.
Fonti: [3kmcks], Lawson (1996).

	Energia immagazzinata (kWh/m^2)
Muri	
Struttura e rivestimento in legno, pareti interne in cartongesso	52
Struttura di legno, rivestimento in mattoni di argilla, pareti interne in cartongesso	156
Struttura di legno, rivestimento in alluminio, pareti interne in cartongesso	112
Struttura in acciaio, rivestimento in mattoni di argilla, pareti interne in cartongesso	168
Strato doppio di mattoni di argilla, pareti in cartongesso	252
Terra cruda con calcestruzzo	104
Pavimenti	
Pavimento di legno sopraelevato	81
Soletta di calcestruzzo da 110 mm sul suolo	179
Travi a T e lastre di calcestruzzo prefabbricate da 200 mm	179
Soffitti	
Struttura di legno, lastre di calcestruzzo, soffitto di cartongesso	70
Struttura di legno, pianelle di terracotta, soffitto di cartongesso	75
Struttura di legno, lastre di acciaio, soffitto di cartongesso	92

Nella Tabella H.6 si usano questi numeri per stimare il fabbisogno energetico del processo di costruzione di un appartamento di una villetta bifamigliare con tre stanze da letto. Il *fabbisogno lordo di energia* allarga i confini includendo anche l'energia immagazzinata dall'infrastruttura urbana e l'energia immagazzinata dalla macchina che produce i materiali usati. Una regola spannometrica per ottenere la stima del fabbisogno energetico lordo di un edificio consiste nel raddoppiare il valore del fabbisogno energetico del processo di costruzione [3kmcks].

Se dividiamo il valore di 42 000 kWh per 100 anni e raddoppiamo il risultato per stimare il costo dell'energia lorda, allora il totale dell'energia immagazzinata da una casa diventa circa 2.3 kWh/gg. Questo valore si riferisce al costo energetico del solo *scheletro* della casa – ovvero ai mattoni, le piastrelle e le putrelle del soffitto.

	Superficie (m^2)	×	densità di energia (kWh/m^2)		energia (kWh)
Pavimenti	100	×	81	=	8100
Soffitto	75	×	75	=	5600
Muri esterni	75	×	252	=	19 000
Muri interni	75	×	125	=	9400
Totale					42 000

Tabella H.6. Fabbisogno energetico del processo di costruzione di un appartamento di una villetta bifamigliare con tre stanze da letto.

Note ed approfondimenti

p.

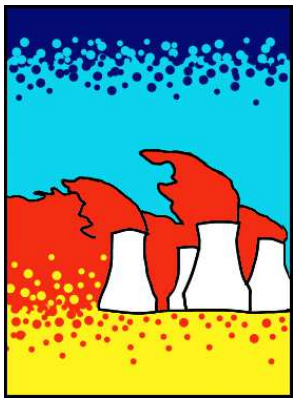
360 *Uno studio successivo a questo più dettagliato e commissionato da DEFRA ha stimato che il carbonio contenuto ammonta a circa 6.2 tonnellate di CO_2e per persona.* Wiedmann et al. (2008).

Ulteriori riferimenti: `www.greenbooklive.com` presenta le analisi di ciclo di vita [Life Cycle Assessment, LCA. (N.d.T.)] dei prodotti per costruzione.
Dritte utili sull'analisi del ciclo di vita: `www.gdrc.org/uem/lca/life-cycle.html`.
Altri siti: `www.epa.gov/ord/NRMRL/lcaccess/resources.htm`.

Figura H.7. Viadotto di Millau in Francia, il più alto ponte al mondo. Fatto di calcestruzzo e acciaio, misura 2.5 km di lunghezza e 353 m di altezza.

Parte IV

Dati utili



I Riferimenti rapidi

Unità di misura del SI

> **Il watt**. Questa unità di misura del SI prende il nome da James Watt. Come per tutte le unità di misura del SI, la cui denominazione derivi dal nome proprio di una persona, la prima lettera del simbolo corrispondente è maiuscola (W). Tuttavia, ogni volta che l'unità di misura del SI viene riportata per intero, dovrebbe essere sempre scritta in caratteri minuscoli (watt), con la sola eccezione dei "gradi Celsius".
>
> da wikipedia

SI sta per Sistema Internazionale. Le unità di misura del SI sono quelle che tutti gli ingegneri dovrebbero utilizzare, onde evitare la perdita di veicoli spaziali.

SI unità		
energia	un joule	1 J
potenza	un watt	1 W
forza	un newton	1 N
lunghezza	un metro	1 m
tempo	un secondo	1 s
temperatura	un kelvin	1 K

prefisso	chilo	mega	giga	tera	peta	exa
simbolo	k	M	G	T	P	E
fattore	10^3	10^6	10^9	10^{12}	10^{15}	10^{18}

prefisso	centi	milli	micro	nano	pico	femto
simbolo	c	m	μ	n	p	f
fattore	10^{-2}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}	10^{-15}

Tabella I.1. unità di misura del SI e prefissi

Le mie unità di misura preferite per energia, potenza ed efficienza dei trasporti

Le mie unità di misura preferite, espresse nel SI			
energia	un chilowattora	1 kWh	3 600 000 J
potenza	un chilowattora al giorno	1 kWh/gg	$(1000/24)\,\mathrm{W} \simeq 40\,\mathrm{W}$
forza	un chilowattora per 100 km	1 kWh/100 km	36 N
tempo	un'ora	1 h	3600 s
	un giorno	1 gg	$24 \times 3600\,\mathrm{s} \simeq 10^5\,\mathrm{s}$
	un anno	1 anno	$365.25 \times 24 \times 3600\,\mathrm{s} \simeq \pi \times 10^7\,\mathrm{s}$
forza per massa	chilowattora per tonnellate a km	1 kWh/t-km	$3.6\,\mathrm{m/s^2}$ ($\simeq 0.37g$)

Unità di misura e simboli supplementari

Oggetto della misura	nome dell'unità di misura	simbolo	valore
esseri umani	persona	p	
massa	tonnellata	t	1 t = 1000 kg
	giga-tonnellata	Gt	1 Gt = $10^9 \times 1000$ kg = 1 Pg
trasporto	persone a chilometro	p-km	
trasporto	tonnellate a chilometro	t-km	
volume	litro	l	1 l = 0.001 m^3
area	chilometro quadrato	kmq, km^2	1 kmq = 10^6 m^2
	ettaro	ha	1 ha = 10^4 m^2
	Galles		1 Galles = 21 000 km^2
	Londra (Grande Londra)		1 Londra = 1580 km^2
energia	Dinorwig		1 Dinorwig = 9 GWh

Miliardi, milioni ed altri prefissi usati altrove

In tutto questo libro "un bilione" (1 bn) [per semplicità e chiarezza si è tradotto sempre con "un miliardo", abbreviato 1 mld. (N.d.T.)] rappresenta lo standard americano per un miliardo, vale a dire, 10^9, ossia mille milioni. Un trilione è 10^{12} [in realtà, in italiano e per il SI, sarebbe questo il bilione. (N.d.T.)]. Il prefisso standard che significa "miliardi" (10^9) è "giga".

Nell'Europa continentale, Mio e Mrd denotano un milione ed un miliardo, rispettivamente. Per la precisione Mrd è l'abbreviazione per miliardo, che significa 10^9.

L'abbreviazione m è spesso usata per indicare i milioni, ma è incompatibile con il SI – si pensi a mg (milligrammo) per esempio. Pertanto, non utilizzo m con il significato di milioni. Laddove alcuni utilizzano "m", io l'ho rimpiazzata con "M". Per esempio, uso Mtep per milioni di tonnellate equivalenti di petrolio e Mt CO_2 per milioni di tonnellate equivalenti di CO_2.

Unità di misura fastidiose

Esistono un mucchio di unità di misura comunemente usate, che sono fastidiose per varie ragioni. Ho dedotto il significato di alcune. Ve le elenco qui, per aiutarvi a tradurre le storie raccontate dai media.

Case

La "casa" è comunemente usata ogni volta che si descrive la potenza degli impianti che impiegano fonti rinnovabili. Per esempio: "Il parco eolico di Whitelee, da £300 mln, con le sue 140 turbine genererà 322 MW – sufficienti ad alimentare 200 000 case". La "casa" è definita dalla British Wind Energy Association come una potenza pari a 4700 kWh all'anno

[www.bwea.com/ukwed/operational.asp]. Vale a dire 0.54 kW, ossia 13 kWh al giorno. (Qualche altra organizzazione usa 4000 kWh/anno per nucleo famigliare).

La "casa" mi infastidisce perché temo che la gente la confonda con *i consumi energetici totali degli occupanti/abitanti* – ma questi ultimi sono di fatto 24 volte superiori. La "casa" copre esclusivamente i consumi domestici medi di un nucleo famigliare in termini di *elettricità*. Non riguarda il modo in cui gli abitanti riscaldano la loro casa. Né il loro posto di lavoro. Né come viaggiano. Né tutte quelle altre cose che la società fornisce loro consumando energia.

Per inciso, quando parlano delle emissioni di CO_2 di una casa, il "tasso di cambio ufficiale" risulta essere pari a 4 tonnellate di CO_2 per casa all'anno.

Centrali elettriche

Le idee per risparmiare energia vengono talvolta descritte in termini di centrali elettriche. Per esempio, secondo un rapporto della BBC riguardo alla sostituzione delle lampadine dei semafori con LED di eterna durata, "il risparmio energetico sarebbe enorme – mantenere attivi i semafori della Gran Bretagna richiede qualcosa come l'equivalente di due centrali elettriche di medie dimensioni". news.bbc.co.uk/1/low/sci/tech/specials/sheffield_99/449368.stm

Cosa significa una centrale elettrica di medie dimensioni? 10 MW? 50 MW? 100 MW? 500 MW? Non ne ho la più pallida idea. Una ricerca su Google indica che alcune persone pensano che si tratti di 30 MW, altri 250 MW, altri 500 MW (la scelta più comune), ma altri ancora dicono 800 MW. Che unità di misura inutile!

Sicuramente il rapporto avrebbe fatto più chiarezza riguardo ai semafori esprimendo il concetto in termini di percentuale. "Tenere i semafori del Regno Unito attivi richiede 11 MW di energia elettrica, ossia lo 0.03% dell'elettricità del Regno Unito". Questo avrebbe rivelato quanto sia "enorme" il risparmio energetico.

La Figura I.2 mostra le potenze installate in 19 centrali elettriche a carbone della Gran Bretagna.

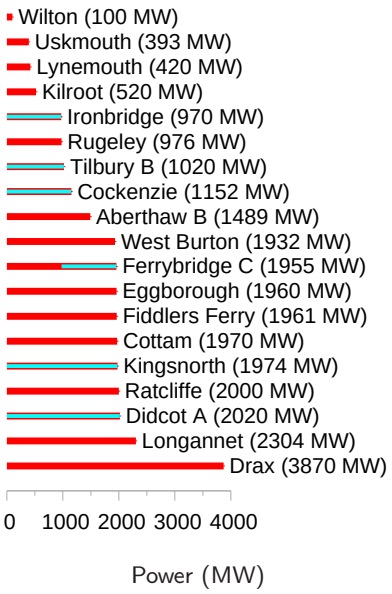


Figura I.2. Potenze installate delle varie centrali elettriche britanniche a carbone. Evidenziati in blu 8 GW di capacità di generazione di centrali che chiuderanno entro il 2015. 2500 MW, condivisi in tutta la Gran Bretagna, sono la stessa cosa di 1 kWh al giorno a persona.

Automobili tolte dalla strada

Alcuni annunci pubblicitari descrivono la riduzione dell'inquinamento da CO_2 in termini di "numero equivalente di autovetture tolte dalla strada". Ad esempio, Richard Branson afferma che se il parco treni Voyager della Virgin passasse al biodiesel per un 20% – tra l'altro, non trovate scandaloso chiamare un treno "treno verde alimentato a biodiesel" quando va per l'80% a combustibili fossili e solo per il 20% a biodiesel? – perdonate la distrazione. Richard Branson dice che *se* il parco treni Voyager della Virgin passasse al biodiesel per un 20% – sottolineo il "*se*", perché la gente come Beardie ottiene sempre pubblicità dai media per annunciare che sta

pensando di fare tante belle cose, ma alcune di queste iniziative sono solo fanfaronate, che vengono in seguito annullate in tutta tranquillità, come l'idea di trainare gli aeromobili negli spostamenti su e giù all'interno degli aeroporti, in modo da renderli più verdi – scusate, mi sono distratto di nuovo. Richard Branson asserisce che *qualora* i treni della Virgin della flotta Voyager passassero al biodiesel per un 20%, si avrebbe una riduzione pari a 34 500 tonnellate di CO_2 all'anno, equivalente a "23 000 autovetture tolte dalla strada". Questa dichiarazione rivela il seguente tasso di cambio:

"un'auto tolta dalla strada" $\longleftrightarrow$ -1.5 t all'anno di CO_2.

Calorie

La caloria è irritante, perché la comunità dei dietologi/dietisti e seguaci vari chiama una chilocaloria "Caloria". 1 Caloria alimentare = 1000 calorie.

2500 kcal = 3 kWh = 10 000 kJ = 10 MJ.

Barili

Il barile è un'unità di misura fastidiosa, amata dalla comunità dei petrolieri ed affini, insieme alla tonnellata di petrolio. Perché non possono attenersi ad una sola unità? Un barile di petrolio significa 6.1 GJ o 1700 kWh.

I barili sono doppiamente irritanti perché esistono molteplici definizioni di barile, tutte aventi volumi differenti.

Ecco tutto quello che c'è da sapere sui barili di petrolio. Un barile è pari a 42 galloni USA, ossia 159 litri. Un barile di petrolio è pari a 0.1364 t di petrolio. Un barile di greggio ha un'energia di 5.75 GJ. Un barile di petrolio pesa 136 kg. Una tonnellata di petrolio grezzo è pari a 7.33 barili e 42.1 GJ. Il tasso di inquinamento da carbonio del greggio è di 400 kg di CO_2 a barile. `www.chemlink.com.au/conversions.htm` Questo significa che quando il prezzo del petrolio è di \$100 al barile, il costo energetico del petrolio è pari a 6¢ per kWh. Se ci fosse una tassazione del carbonio sui combustibili fossili pari a \$250 per tonnellata di CO_2 il prezzo al barile del petrolio aumenterebbe di \$100.

Galloni

Il gallone sarebbe anche un'unità di misura buona e "a misura d'uomo", se non fosse che gli yankee hanno incasinato tutto definendo il gallone in modo diverso dagli altri, come hanno fatto con la pinta e il quarto [1 quarto made in USA sono circa 946 millimetri. Ma esiste anche il quarto di gallone ... (N.d.T.)]. Tutti i volumi negli Stati Uniti sono circa i cinque sesti di quelli corretti.

1 gallone USA = 3.785 l = 0.83 galloni imperiali. 1 gallone imperiale = 4.545 l.

Tonnellate

Le tonnellate sono fastidiose, perché esistono quelle americane, quelle imperiali e quelle metriche. I valori corrispondenti sono abbastanza simili,

per cui non mi sono preoccupato di fare distinzioni. 1 tonnellata americana (2000 lb) = 907 kg; 1 tonnellata imperiale (2240 lb) = 1016 kg; 1 tonnellata metrica (ossia una tonnellata) = 1000 kg.

BTU e quadrilioni

Le unità di misura termiche britanniche sono fastidiose, perché non fanno parte del *Sistema Internazionale*, né sono di una dimensione utile. Come l'inutile joule, sono troppo piccole; quindi per farne un uso pratico bisogna srotolare prefissi sciocchi come "quadrilione" (10^{15}) [che nel SI sarebbe il "biliardo". (N.d.T.)].

1 kJ sono 0.947 BTU. 1 kWh sono 3409 BTU.

Un "quad" è 1 quadrilione di BTU = 293 TWh.

Unità di misura divertenti

Tazze di tè

È questo un buon modo per rendere i pannelli solari allettanti? "Una volta che tutti i 7 000 pannelli fotovoltaici saranno attivi, si prevede che genereranno 180 000 unità di energia elettrica rinnovabile ogni anno – l'energia sufficiente per fare **nove milioni di tazze di tè**". Questo annuncio fa dunque equivalere 1 kWh a 50 tazze di tè.

Essendo un'unità di volume, 1 tazza made in USA (metà di una pinta statunitense) equivale ufficialmente a 0.24 l; ma una tazza di tè o caffè vuol dire di norma 0.18 l. Portare 50 tazze di acqua, 0.18 l per tazza, da 15 °C a 100 °C richiede 1 kWh.

Sicché "nove milioni di tazze di tè all'anno" è un altro modo di dire "20 kW."

Autobus a due piani, sale da concerto grandi come la Royal Albert Hall e stadi di Wembley

"Se tutti quelli che possono farlo nel Regno Unito applicassero l'isolamento delle cavità nelle pareti, potremmo ridurre le emissioni di anidride carbonica per un ammontare enorme, pari a 7 milioni di tonnellate. Così tanta anidride carbonica basterebbe a riempire quasi 40 milioni di autobus a due piani o il nuovo stadio di Wembley 900 volte!"

Da cui si apprende il fatto che un Wembley è pari a 44 000 autobus a due piani. In effetti, la ciotola di Wembley ha un volume di 1 140 000 m^3.

"Se ogni famiglia installasse una sola lampadina a risparmio energetico, si risparmierebbe abbastanza anidride carbonica da riempire la Royal Albert Hall 1 980 volte!" (Una Albert Hall sono 100 000 m^3.)

Esprimere le quantità di CO_2 in termini di volume, piuttosto che di massa è un ottimo modo per farle sembrare grandi. Nel caso in cui "1 kg di CO_2 al giorno" dovesse sembrare troppo piccolo, basta dire "200 000 litri di CO_2 all'anno"!

massa di CO_2	↔	volume
2 kg CO_2	↔	1 m^3
1 kg CO_2	↔	500 litri
44 g CO_2	↔	22 litri
2 g CO_2	↔	1 litro

Tabella I.3. conversione volume-massa.

Occupazione del suolo	area per persona (m^2)	percentuale
– edifici domestici	30	1.1
– giardini di casa	114	4.3
– altri edifici	18	0.66
– strade	60	2.2
– ferrovie	3.6	0.13
– sentieri	2.9	0.11
– aree verdi	2335	87.5
– acqua	69	2.6
– altri usi	37	1.4
Totale	2670	100

Tabella I.6. Porzioni di territorio, in Inghilterra, dedicate ad usi differenti. Fonte: Generalized Land Use Database Statistics for England 2005. [3b7zdf]

Più volumi

Un container è largo 2.4 m, alto 2.6 m per 6.1 o 12.2 metri di lunghezza (per il TEU e FEU, rispettivamente).

Un TEU è la dimensione di un piccolo container da 20 piedi – volume interno pari a circa 33 m^3. La maggior parte dei container che si vedono oggi in giro sono da 40 piedi con una dimensione di 2 TEU. Un container da 40 piedi pesa 4 tonnellate e può trasportare 26 tonnellate di roba, il suo volume è di 67.5 m^3.

Una piscina ha un volume di circa 3000 m^3.

Un autobus a due piani ha un volume di 100 m^3.

Una mongolfiera ha un volume di 2500 m^3.

La grande piramide di Giza occupa un volume di 2 500 000 metri cubi.

Figura I.4. Un container da venti piedi (1 TEU).

Aree

L'area della superficie del globo terraqueo è di 500×10^6 km^2; quella delle terre emerse è di 150×10^6 km^2.

Di norma un campo da calcio occupa una superficie di 8000 m^2; quello per il football americano 5350 m^2.

La mia tipica casa britannica con tre camere da letto ha una superficie calpestabile di 88 m^2. Negli Stati Uniti d'America, le dimensioni medie di una casa unifamiliare sono di 2330 piedi quadrati (216 m^2).

ettaro	$= 10^4$ m^2
acro	$= 4050$ m^2
miglio quadrato	$= 2.6$ km^2
piede quadrato	$= 0.093$ m^2
yard quadrato	$= 0.84$ m^2

Tabella I.5. Aree.

Potenze

Aggiungere il suffisso "e" ad un potenza significa parlare in modo esplicito di energia elettrica. Così, ad esempio, l'output di una centrale può essere 1 GW(e), mentre il tasso di utilizzo della potenza chimica potrebbe essere pari a 2.5 GW. Analogamente il suffisso "th" può venire aggiunto

1000 BTU all'ora	=	0.3 kW	=	7 kWh/gg
1 cavallo (1 hp o 1 cv o 1 ps)	=	0.75 kW	=	18 kWh/gg
		1 kW	=	24 kWh/gg

1 unità termica	=	29.31 kWh
1000 Btu	=	0.2931 kWh
1 MJ	=	0.2778 kWh
1 GJ	=	277.8 kWh
1 tep (tonnellate di petrolio equivalente)	=	11 630 kWh
1 kcal	=	1.163×10^{-3} kWh

1 kWh	=	0.03412	3412	3.6	86×10^{-6}	859.7
		unità termiche	Btu	MJ	tep	kcal

Box I.7. Ecco come le altre unità di misura dell'energia e della potenza sono messe in relazione con il chilowattora ed il chilowattora al giorno.

ad indicare che una data quantità di potenza è termica. Gli stessi suffissi possono essere applicati quando si ha a che fare con l'energia. "La mia abitazione utilizza 2 kWh(e) di elettricità al giorno".

Se si aggiunge il suffisso "p" ad una potenza, questo indica che si tratta di una potenza di "picco", ossia una capacità. Per esempio, 10 m^2 di pannelli potrebbero avere una potenza di 1 kWp.

1 kWh/gg = $\frac{1}{24}$ kW.

1 tep/anno = 1.33 kW.

La benzina fuoriesce dalla pompa del benzinaio a circa mezzo litro al secondo. Il che significa 5 kWh al secondo, ossia 18 MW.

La potenza di un'auto da corsa nella Formula Uno è di 560 kW.

I consumi elettrici del Regno Unito ammontano a 17 kWh al giorno a persona, ossia 42.5 GW per Regno-Unito.

"Una tonnellata" di aria condizionata = 3.5 kW.

Consumi energetici mondiali

I consumi energetici mondiali ammontano a 15 TW, in termini di potenza; quelli elettrici a 2 TW.

Fattori di conversione utili

Per passare da TWh all'anno a GW, dividere per 9.
1 kWh/gg a persona equivale a 2.5 GW per Regno-Unito, ossia 22 TWh/anno per Regno-Unito
Per passare da mpg (miglia per gallone UK) a km al litro, dividere per 3.
A temperatura ambiente, $1\,kT = \frac{1}{40}$eV
A temperatura ambiente, $1\,kT$ per molecola = 2.5 kJ/mol.

Lettura del contatore

Ecco come convertire la lettura del contatore del gas in chilowattora:

- Se le cifre del contatore sono in **centinaia di piedi cubici**, si prenda il numero di unità consumate e lo si moltiplichi per **32.32**, così da ottenere i kWh.
- Se le cifre del contatore sono in **metri cubici**, si prenda il numero di unità consumate e lo si moltiplichi per **11.42**, così da ottenere i kWh.

	kWh/t-km
acque interne	0.083
su ferro	0.083
su gomma	0.75
via aria	2.8
oleodotto	0.056
gasdotto	0.47
in acque internazionali (container)	0.056
in acque internazionali (cargo)	0.056
in acque internazionali (cisterne)	0.028

Tabella I.8. Intensità energetica delle varie modalità di trasporto negli USA. Fonte: Weber and Matthews (2008).

Potere calorifico dei combustibili

Petrolio grezzo: 37 MJ/l; 10.3 kWh/l.
Gas naturale: 38 MJ/m^3. (La densità del metano è di 1.819 kg/m^3).
1 tonnellata di carbone fossile: 29.3 GJ; 8000 kWh.
Energia di fusione nucleare ricavabile dall'acqua comune: 1800 kWh al litro [e.g. 1 g di deuterio trasformandosi completamente in elio sprigiona un'energia pari a 180 000 kWh, in aggiunta nell'acqua normale si trova tipicamente anche del trizio. (N.d.T.)].
Si vedano anche la tabella 26.14, p. 221, e la tabella D.3, p. 317.

Calore specifico

Il calore specifico dell'aria è pari a 1 kJ/kg/°C, ossia 29 J/mol/°C [entropia molare. (N.d.T.)]. La densità dell'aria è di 1.2 kg/m^3. Da cui il calore specifico per unità di volume: 1.2 kJ/m^3/°C.

Il calore latente nella vaporizzazione dell'acqua: 2257.92 kJ/kg. Il calore specifico del vapore acqueo: 1.87 kJ/kg/°C. Il calore specifico dell'acqua: 4.2 kJ/l/°C.

La densità del vapore è di 0.590 kg/m^3.

Pressione

Pressione atmosferica: 1 bar $\simeq 10^5$ Pa (pascal). Pressione a 1000 m di profondità sott'acqua: 100 bar. Pressione a 3000 m sott'acqua: 300 bar. [Questi ultimi valori sono di pressione assoluta, ossia della sola colonna d'acqua. (N.d.T.)].

Soldi

Quando si parla di soldi ho considerato i seguenti tassi di cambio: €1 = $1.26; £1 = $1.85 ; $1 = $1.12 dollari canadesi. Questi erano quelli corretti a metà del 2006.

Fattori di conversione per i gas-serra

Francia	83
Svezia	87
Canada	220
Austria	250
Belgio	335
Unione Europea	353
Finlandia	399
Spagna	408
Giappone	483
Portogallo	525
Regno Unito	580
Lussemburgo	590
Germania	601
USA	613
Paesi Bassi	652
Italia	667
Irlanda	784
Grecia	864
Danimarca	881

Figura I.9. Intensità del carbonio nella produzione di energia elettrica (g CO_2 per kWh di elettricità).

tipo di combustibile	emissioni (g CO_2 per kWh di energia chimica)
gas naturale	190
gas di raffineria	200
etano	200
GPL	210
cherosene per i jet	240
benzina	240
gasolio/diesel	250
olio pesante	260
nafta	260
carbone di legna	300
carbone fossile	300
coke di petrolio	340

Figura I.10. Emissioni associate alla combustione dei carburanti.
Fonte: DEFRA's Environmental Reporting Guidelines for Company Reporting on Greenhouse Gas Emissions.

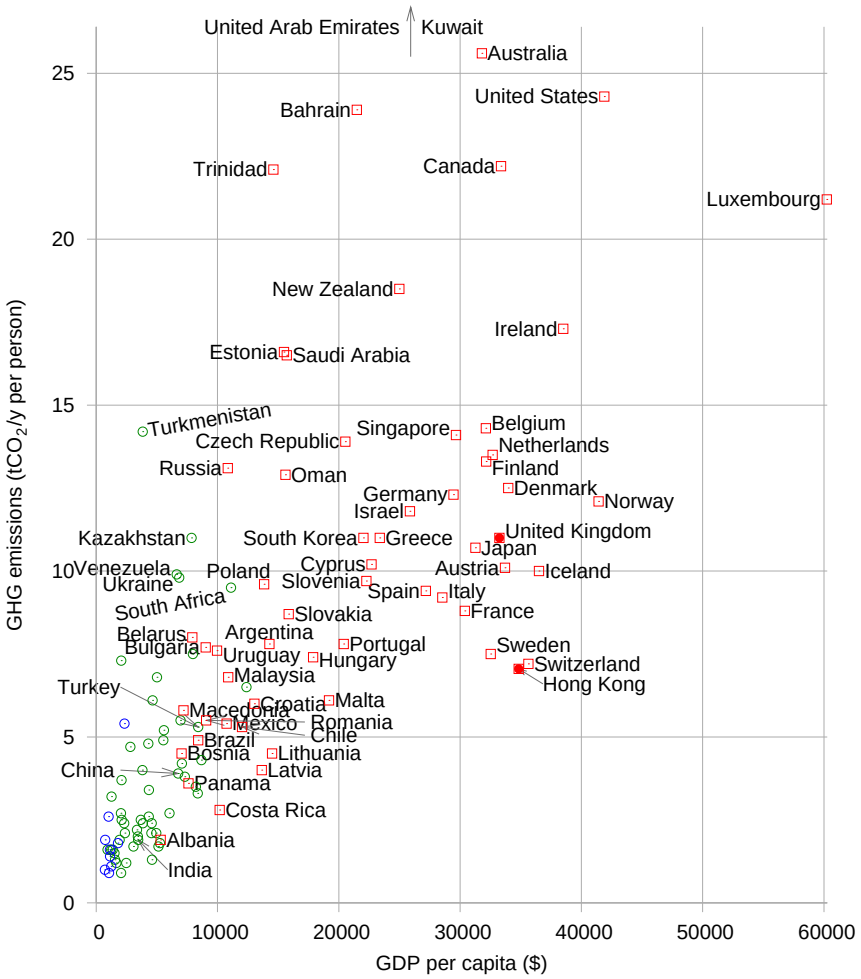


Figura I.11. Emissioni di gas-serra pro capite versus PIL pro capite, in dollari US a parità di potere d'acquisto. I quadrati rappresentano i Paesi aventi un "elevato sviluppo umano"; i cerchi, quelli a "medio sviluppo" o "basso". Si vedano anche le Figure 30.1 (p. 257) e 18.4 (p. 116). Fonte: UNDP Human Development Report, 2007. [3av4s9]

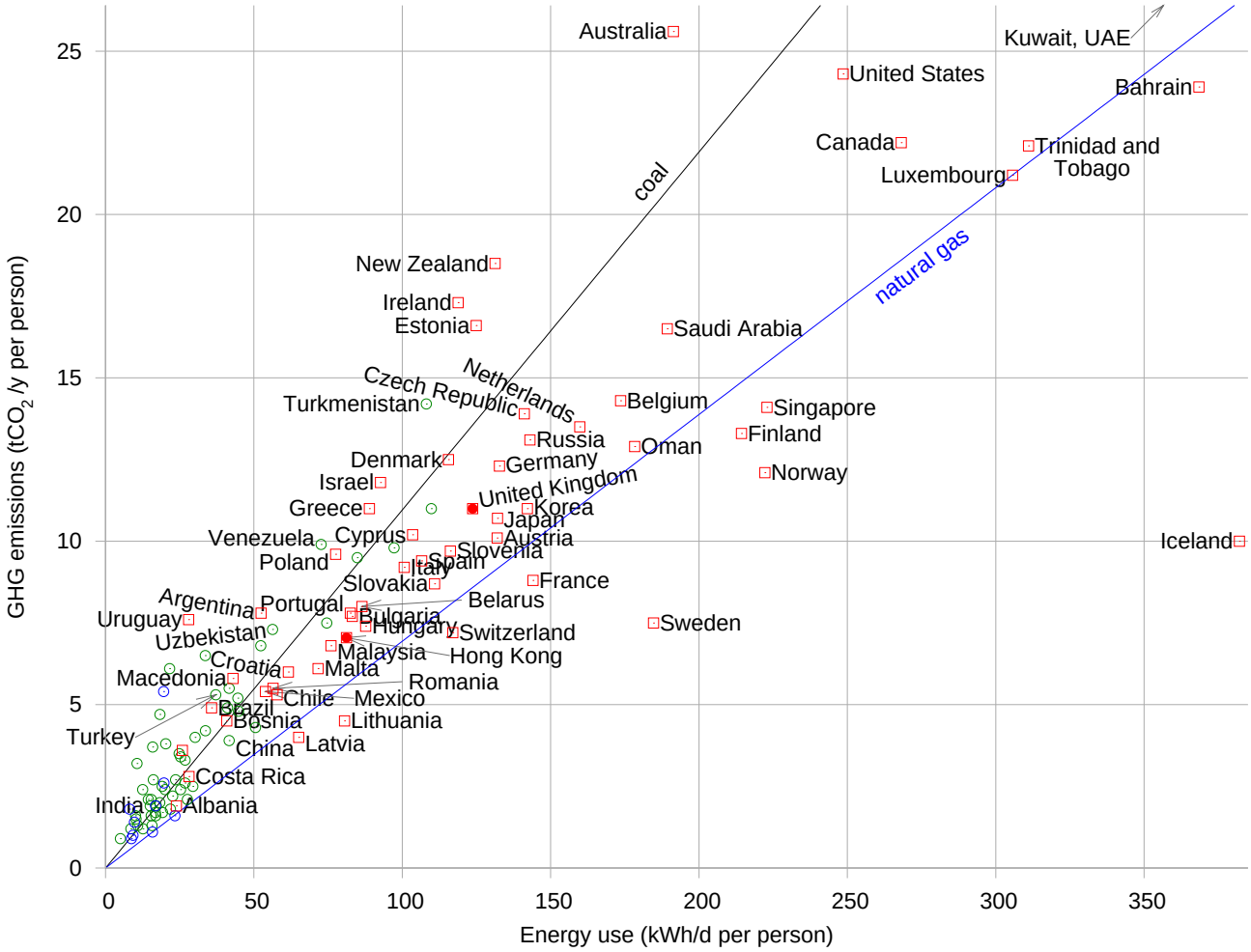


Figura I.12. Emissioni di gas-serra pro capite in funzione dei consumi energetici pro capite. Le linee rappresentano le intensità di emissione del carbone fossile e del gas naturale. I quadrati rappresentano i Paesi aventi un "elevato sviluppo umano"; i cerchi, quelli a "medio sviluppo" o "basso". Si vedano anche le Figure 30.1 (p. 257) e 18.4 (p. 116). Fonte: UNDP Human Development Report, 2007.

J Popolazioni e superfici terrestri

Densità di popolazione

La Figura J.1 mostra le aree di varie regioni del mondo messe in rapporto con le loro popolazioni. Le diagonali del diagramma sono linee a densità costante di popolazione. Il Bangladesh, sulla penultima diagonale a destra, ha una densità di popolazione di 1000 abitanti per chilometro quadrato; India, Inghilterra, Olanda e Giappone hanno densità di popolazione pari ad un terzo: circa 350 abitanti per km^2. Molti Paesi europei hanno circa 100 abitanti per km^2. All'estremo opposto, il Canada, l'Australia e la Libia hanno densità di popolazione pari a circa 3 abitanti per km^2. La diagonale centrale segna la densità di popolazione del mondo: 43 persone per chilometro quadrato. L'America è un Paese nella media, da questo punto di vista: i 48 stati contigui agli USA hanno la stessa densità di popolazione del mondo intero. Regioni particolarmente ricche in termini di superficie territoriale, per le quali la densità di popolazione è al di sotto della media, includono Russia, Canada, America Latina, Sudan, Algeria ed Arabia Saudita.

Di questi grandi Paesi, ricchi di territorio, alcuni non sono così lontani dalla Gran Bretagna; sarebbe, quindi, auspicabile intrattenere con costoro relazioni amichevoli, vale a dire con il Kazakhstan, la Libia, l'Arabia

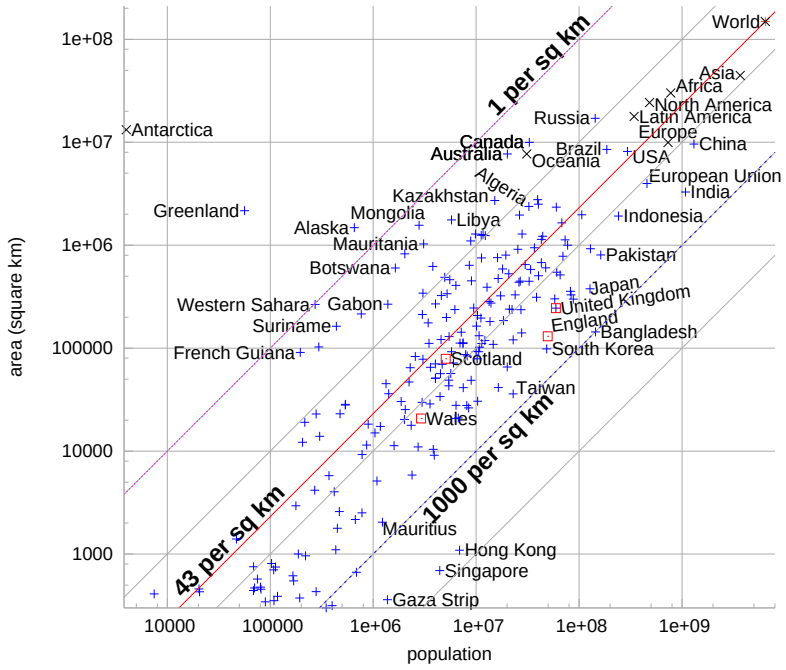


Figura J.1. Popolazioni e superfici dei Paesi e delle regioni del mondo. Entrambe le scale sono logaritmiche. Ogni linea diagonale indica una densità di popolazione; i Paesi a più alta densità di popolazione sono posizionati in basso a destra, mentre le densità di popolazione inferiori si trovano in alto a sinistra.
Gli stessi dati sono forniti in forma tabellare a p. 382.

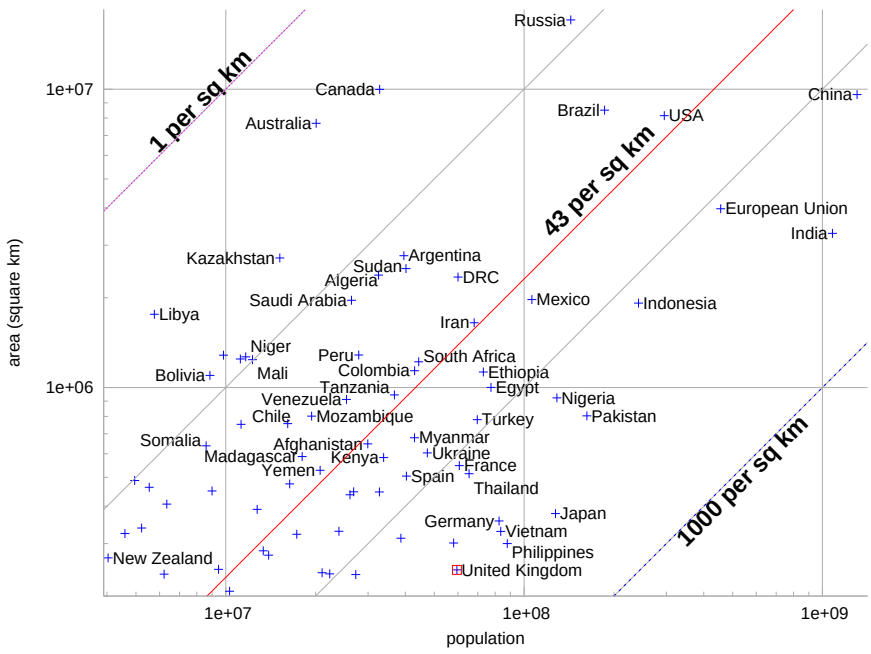


Figura J.2. Popolazioni e superfici dei Paesi e delle regioni del mondo. Entrambe le scale sono logaritmiche. Le diagonali sono linee a densità di popolazione costante. La presente figura illustra un dettaglio della figura J.1 (p. 379).
Gli stessi dati sono forniti in forma tabellare a p. 382.

Saudita, l'Algeria ed il Sudan.

Regione	Popolazione	Superficie territoriale (km^2)	Abitanti per km^2	Superficie per abitante (m^2)
Mondo	6 440 000 000	148 000 000	43	23 100
Asia	3 670 000 000	44 500 000	82	12 100
Africa	778 000 000	30 000 000	26	38 600
Europa	732 000 000	9 930 000	74	13 500
Nord America	483 000 000	24 200 000	20	50 200
America Latina	342 000 000	17 800 000	19	52 100
Oceania	31 000 000	7 680 000	4	247 000
Antartide	4 000	13 200 000		

Tabella J.3. Densità di popolazione dei continenti. Gli stessi dati sono messi su grafico in Figura J.1 e J.2. I dati sono del 2005.

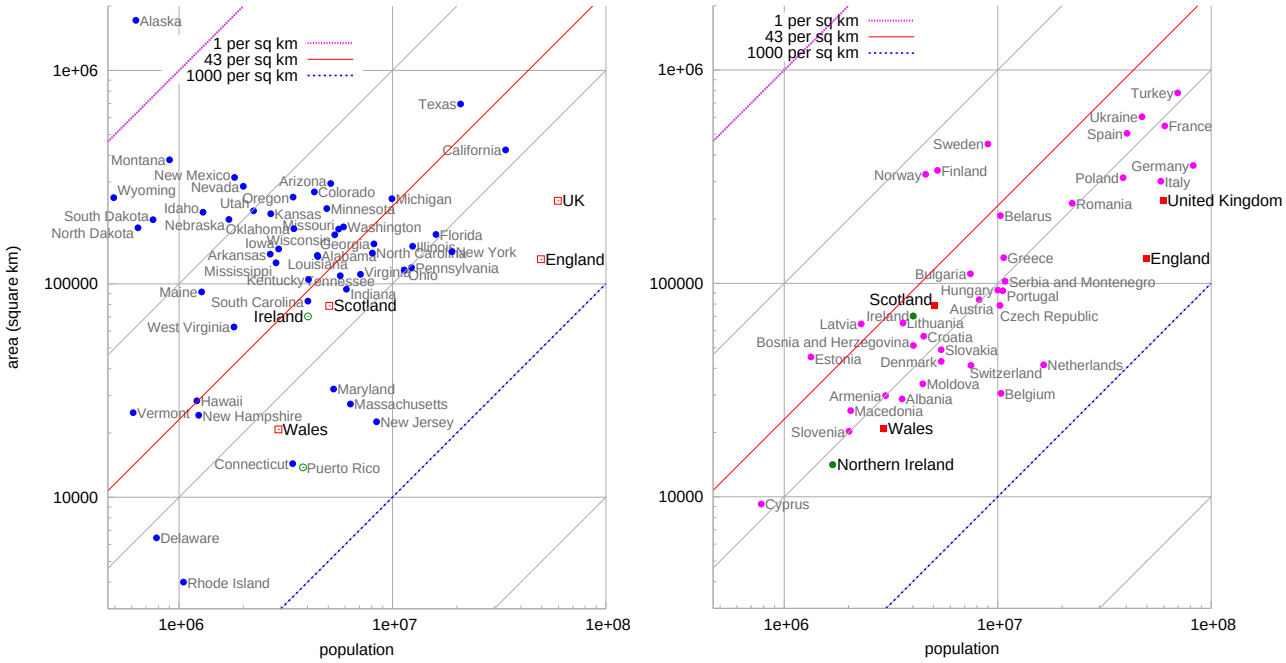


Figura J.4. Popolazioni e superfici degli Stati Uniti d'America e delle regioni europee.

Regione	Popolazione	Superficie (km^2)	Abitanti per km^2	Superficie per abitante (m^2)
Afghanistan	29 900 000	647 000	46	21 600
Africa	**778 000 000**	**30 000 000**	26	38 600
Alaska	655 000	1 480 000	0.44	2 260 000
Albania	3 560 000	28 700	123	8 060
Algeria	32 500 000	2 380 000	14	73 200
Angola	11 100 000	1 240 000	9	111 000
Antartide	4 000	**13 200 000**		
Argentina	39 500 000	2 760 000	14	69 900
Asia	**3 670 000 000**	**44 500 000**	82	12 100
Australia	20 000 000	**7 680 000**	2.6	382 000
Austria	8 180 000	83 800	98	10 200
Bangladesh	**144 000 000**	144 000	1 000	997
Bielorussia	10 300 000	207 000	50	20 100
Belgio	10 000 000	31 000	340	2 945
Bolivia	8 850 000	1 090 000	8	124 000
Bosnia & Herzegovina	4 020 000	51 100	79	12 700
Botswana	1 640 000	600 000	2.7	366 000
Brasile	**186 000 000**	**8 510 000**	22	45 700
Bulgaria	7 450 000	110 000	67	14 800
RCA	3 790 000	622 000	6	163 000
Canada	32 800 000	**9 980 000**	3.3	304 000
Ciad	9 820 000	1 280 000	8	130 000
Cile	16 100 000	756 000	21	46 900
Cina	**1 300 000 000**	**9 590 000**	136	7 340
Colombia	42 900 000	1 130 000	38	26 500
Croazia	4 490 000	56 500	80	12 500
Repubblica Ceca	10 200 000	78 800	129	7 700
RDC	**60 000 000**	2 340 000	26	39 000
Danimarca	5 430 000	43 000	126	7 930
Egitto	**77 500 000**	1 000 000	77	12 900
Inghilterra	49 600 000	130 000	380	2 630
Estonia	1 330 000	45 200	29	33 900
Etiopia	**73 000 000**	1 120 000	65	15 400
Europa	**732 000 000**	**9 930 000**	74	13 500
Unione Europea	**496 000 000**	4 330 000	115	8 720
Finlandia	5 220 000	338 000	15	64 700
Francia	**60 600 000**	547 000	110	9 010
Striscia di Gaza	1 370 000	360	3 820	261
Germania	**82 400 000**	357 000	230	4 330
Grecia	10 600 000	131 000	81	12 300
Groenlandia	56 300	2 160 000	0.026	38 400 000
Hong Kong	6 890 000	1 090	6 310	158
Ungheria	10 000 000	93 000	107	9 290
Islanda	296 000	103 000	2.9	347 000
India	**1 080 000 000**	3 280 000	328	3 040
Indonesia	**241 000 000**	1 910 000	126	7 930
Iran	**68 000 000**	1 640 000	41	24 200
Irlanda	4 010 000	70 200	57	17 500
Italia	**58 100 000**	301 000	192	5 180
Giappone	**127 000 000**	377 000	337	2 960
Kazakhstan	15 100 000	2 710 000	6	178 000
Kenya	33 800 000	582 000	58	17 200
America Latina	**342 000 000**	**17 800 000**	19	52 100
Lettonia	2 290 000	64 500	35	28 200
Libia	5 760 000	1 750 000	3.3	305 000

Regione	Popolazione	Area (km^2)	Abitanti per km^2	Superficie per abitante (m^2)
Lituania	3 590 000	65 200	55	18 100
Madagascar	18 000 000	587 000	31	32 500
Mali	12 200 000	1 240 000	10	100 000
Malta	398 000	316	1 260	792
Mauritania	3 080 000	1 030 000	3	333 000
Messico	**106 000 000**	1 970 000	54	18 500
Moldavia	4 450 000	33 800	131	7 590
Mongolia	2 790 000	1 560 000	1.8	560 000
Mozambico	19 400 000	801 000	24	41 300
Myanmar	42 900 000	678 000	63	15 800
Namibia	2 030 000	825 000	2.5	406 000
Paesi Bassi	16 400 000	41 500	395	2 530
Nuova Zelanda	4 030 000	268 000	15	66 500
Niger	11 600 000	1 260 000	9	108 000
Nigeria	**128 000 000**	923 000	139	7 170
Nord America	**483 000 000**	**24 200 000**	20	50 200
Norvegia	4 593 000	324 000	14	71 000
Oceania	31 000 000	**7 680 000**	4	247 000
Pakistan	**162 000 000**	803 000	202	4 940
Perù	27 900 000	1 280 000	22	46 000
Filippine	**87 800 000**	300 000	292	3 410
Polonia	39 000 000	313 000	124	8 000
Portogallo	10 500 000	92 300	114	8 740
Repubblica di Macedonia	2 040 000	25 300	81	12 300
Romania	22 300 000	237 000	94	10 600
Russia	**143 000 000**	**17 000 000**	8	119 000
Arabia Saudita	26 400 000	1 960 000	13	74 200
Scozia	5 050 000	78 700	64	15 500
Serbia & Montenegro	10 800 000	102 000	105	9 450
Singapore	4 420 000	693	6 380	156
Slovacchia	5 430 000	48 800	111	8 990
Slovenia	2 010 000	20 200	99	10 000
Somalia	8 590 000	637 000	13	74 200
Sud Africa	44 300 000	1 210 000	36	27 500
Corea del Sud	48 400 000	98 400	491	2 030
Spagna	40 300 000	504 000	80	12 500
Sudan	40 100 000	2 500 000	16	62 300
Suriname	438 000	163 000	2.7	372 000
Svezia	9 000 000	449 000	20	49 900
Svizzera	7 480 000	41 200	181	5 510
Taiwan	22 800 000	35 900	636	1 570
Tanzania	36 700 000	945 000	39	25 700
Thailandia	**65 400 000**	514 000	127	7 850
Turchia	**69 600 000**	780 000	89	11 200
Ucraina	47 400 000	603 000	78	12 700
Regno Unito	**59 500 000**	***244 000***	*243*	***4 110***
USA (escl. Alaska)	**295 000 000**	**8 150 000**	36	27 600
Venezuela	25 300 000	912 000	28	35 900
Vietnam	**83 500 000**	329 000	253	3 940
Galles	2 910 000	20 700	140	7 110
Sahara Occidentale	273 000	266 000	1	974 000
Mondo	**6 440 000 000**	**148 000 000**	43	23 100
Yemen	20 700 000	527 000	39	25 400
Zambia	11 200 000	752 000	15	66 800

Tabella J.5. Regioni e relative densità di popolazione. Le popolazioni che superano i 50 milioni e le superfici più grandi di 5 mln km^2 sono messe in evidenza. Gli stessi dati sono messi su grafico in figura J.1 (p. 379). I dati sono del 2005.

K Storia dell'energia nel Regno Unito

Fonti primarie	kWh/gg/p	kWh(e)/gg/p
Petrolio	43	
Gas naturale	47	
Carbone	20	
Nucleare	9	→ 3.4
Idroelettrico		0.2
Altre rinnovabili		0.8

Tabella K.1. Ripartizione delle fonti di energia primaria nel Regno Unito (2004–2006).

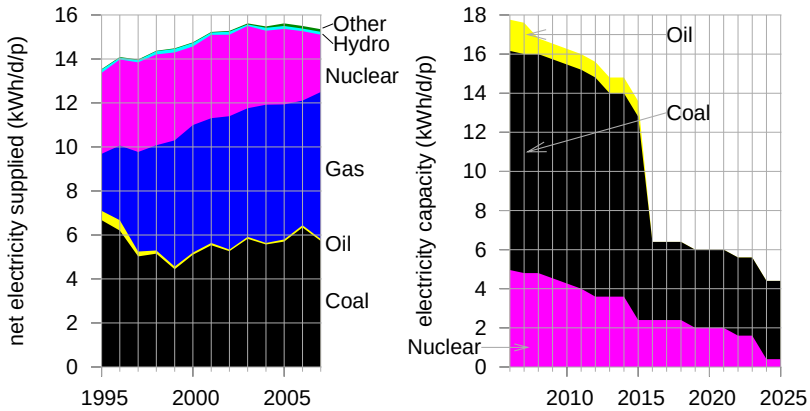


Figura K.2. A sinistra: fornitura netta di energia elettrica per il Regno Unito, suddivisa per fonte, in kWh al giorno a persona. (Altri 0.9 kWh/gg/p vengono utilizzati dagli stessi generatori).
A destra: deficit energetico provocato dalla chiusura delle centrali elettriche nel Regno unito, secondo le previsioni della società EdF. Questo grafico mostra la *capacità* prevista per le centrali nucleari, a carbone, petrolio, in chilowattora al giorno per persona. La capacità è la potenza massima erogabile da una fonte.

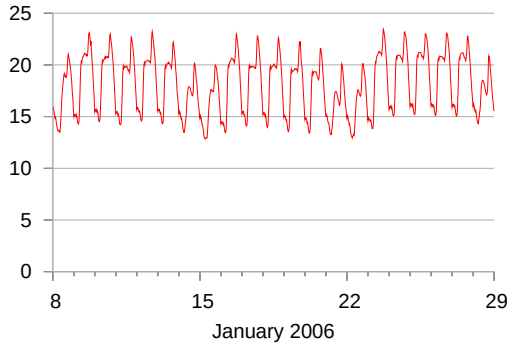


Figura K.3. Domanda di elettricità in Gran Bretagna (in kWh/gg a persona) durante due settimane dell'inverno del 2006. I picchi in gennaio si sono presentati alle 6 di sera di ciascun giorno. (Se si desidera ottenere la domanda a livello nazionale in GW, la parte alta del grafico, 24 kWh/gg a persona, corrisponde a 60 GW per Regno-Unito).

	2006	2007
"Unità primarie" (i primi 2 kWh/gg)	10.73 p/kWh	17.43 p/kWh
"Unità secondarie" (il resto)	8.13 p/kWh	9.70 p/kWh

Tabella K.4. Spese domestiche per la bolletta elettrica (2006, 2007) per i clienti della Powergen a Cambridge, ivi comprese le tasse.

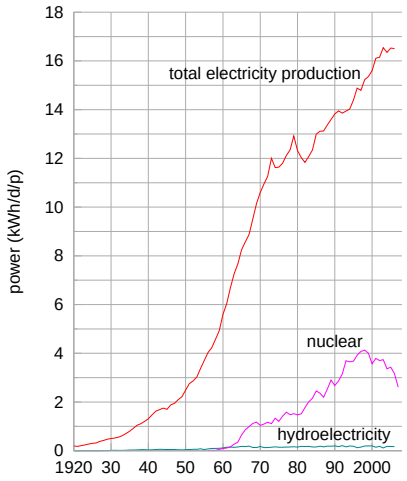


Figura K.5. Grafico storico della produzione di elettricità nel Regno Unito: totale, produzione idroelettrica ed elettro-nucleare.
Le potenze sono espresse "per persona" dividendole per 60 milioni di abitanti.

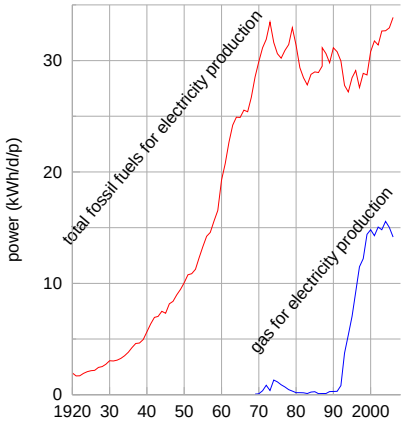


Figura K.6. Grafico storico dell'uso dei combustibili fossili per la produzione di elettricità nel Regno Unito.
Le potenze sono espresse "per persona" dividendole per 60 milioni di abitanti.

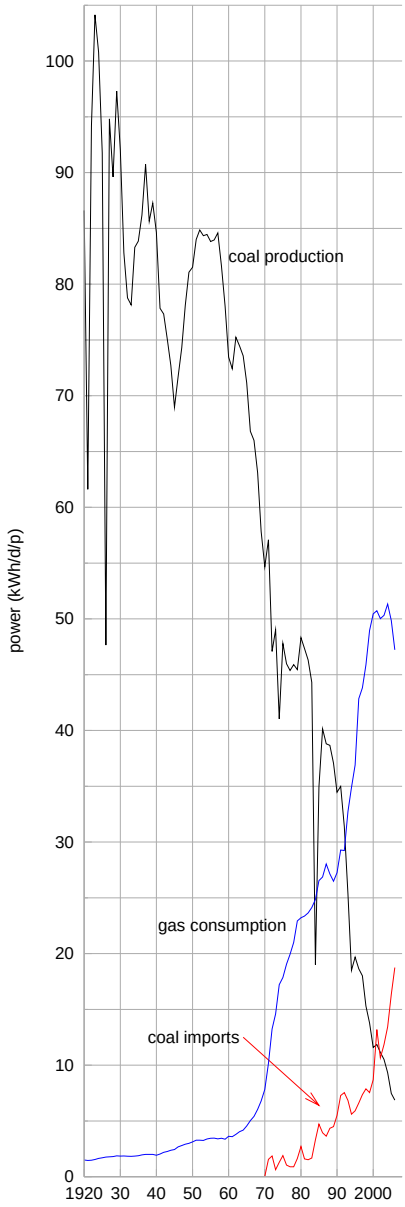


Figura K.7. Produzione ed importazione di carbone nel Regno Unito; consumo del gas nel Regno Unito.
Le potenze sono espresse "per persona" dividendole per 60 milioni di abitanti.

Sitografia

Questa sezione presenta la lista degli indirizzi internet completi che nel testo sono riferiti ad un codice. Ogni indirizzo inizia con il numero di pagina nel quale viene menzionato. Si invita il lettore a collegarsi agli indirizzi `http://tinyurl.com/yh8xse` (o `www.inference.phy.cam.ac.uk/sustainable/book/tex/cft.url.html`) per ritrovare l'hyperlink con cui raggiungere la pagina internet a cui si fa riferimento in questo libro.

Se il lettore dovesse scoprire che un indirizzo URL non è più attivo può provare a recuperare la pagina internet attraverso l'archivio di internet all'indirizzo [f754].

p.	tinyURL	Indirizzo internet completo.
22	ydoobr	www.bbc.co.uk/radio4/news/anyquestions_transcripts_20060127.shtml
22	2jhve6	www.ft.com/cms/s/0/48e334ce-f355-11db-9845-000b5df10621.html
22	25e59w	news.bbc.co.uk/1/low/uk_politics/7135299.stm
22	5o7mxk	www.guardian.co.uk/environment/2007/dec/10/politics
22	5c4olc	www.foe.co.uk/resource/press_releases/green_solutions_undermined_10012008.html
22	2fztd3	www.jalopnik.com/cars/alternative-energy/now-thats-some-high-quality-h20-car-runs-on-water-177788.php
23	26e8z	news.bbc.co.uk/1/hi/sci/tech/3381425.stm
23	ykhayj	politics.guardian.co.uk/terrorism/story/0,,1752937,00.html
23	l6y5g	www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/fig3-1.htm
24	5qfkaw	www.nap.edu/catalog.php?record_id=12181
24	2z2xg7	assets.panda.org/downloads/2_vs_3_degree_impacts_1oct06_1.pdf
25	yyxq2m	www.bp.com/genericsection.do?categoryId=93&contentId=2014442
25	dzcqq	www.defra.gov.uk/environment/climatechange/internat/pdf/avoid-dangercc.pdf
25	y98ys5	news.bbc.co.uk/1/hi/business/4933190.stm
36	5647rh	www.dft.gov.uk/pgr/statistics/datatablespublications/tsgb/
36	27jdc5	www.dft.gov.uk/pgr/statistics/datatablespublications/energyenvironment/tsgb-chapter3energyandtheenvi1863
36	28abpm	corporate.honda.com/environmentology/
36	nmn4l	www.simetric.co.uk/si_liquids.htm
36	2hcgdh	cta.ornl.gov/data/appendix_b.shtml
39	vxhhj	www.cl.cam.ac.uk/research/dtg/weather/
39	tdvml	www.phy.hw.ac.uk/resrev/aws/awsarc.htm
41	3fbufz	www.ipcc.ch/ipccreports/sres/aviation/004.htm
41	3asmgy	news.independent.co.uk/uk/transport/article324294.ece
41	9ehws	www.boeing.com/commercial/747family/technical.html
41	3exmgv	www.ryanair.com/site/EN/about.php?page=About&sec=environment
42	yrnmum	www.grida.no/climate/ipcc/aviation/124.htm
42	36w5gz	www.rolls-royce.com/community/downloads/environment04/products/air.html
51	2rqloc	www.metoffice.gov.uk/climate/uk/location/scotland/index.html
51	2szckw	www.metoffice.gov.uk/climate/uk/stationdata/cambridgedata.txt
51	5hrxls	eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?+s01
51	6z9epq	www.solarcentury.com/knowledge_base/images/solar_pv_orientation_diagram
53	2tl7t6	www.reuk.co.uk/40-Percent-Efficiency-PV-Solar-Panels.htm
54	6hobq2	www.azonano.com/news.asp?newsID=4546
54	2lsx6t	www.udel.edu/PR/UDaily/2008/jul/solar072307.html

54 62ccou www.nrel.gov/news/press/2008/625.html
54 5hzs5y www.ens-newswire.com/ens/dec2007/2007-12-26-093.asp
54 39z5m5 news.bbc.co.uk/1/hi/world/europe/6505221.stm
54 2uk8q8 www.powerlight.com/about/press2006_page.php?id=59
54 2ahecp www.aps.org/meetings/multimedia/upload/The_Status_and_Outlook_for_the_Photovoltaics_Industry_David_E_Carlson.pdf
55 6kqq77 www.defra.gov.uk/erdp/pdfs/ecs/miscanthus-guide.pdf
66 ynjzej www.aceee.org/conf/06modeling/azevado.pdf
72 wbd8o www.ref.org.uk/energydata.php
73 25e59w news.bbc.co.uk/1/low/uk_politics/7135299.stm
73 2t2vjq www.guardian.co.uk/environment/2007/dec/11/windpower.renewableenergy
74 57984r www.businessgreen.com/business-green/news/2205496/critics-question-government
74 6oc3ja www.independent.co.uk/environment/green-living/donnachadh-mccarthy-my-carbonfree-year-767115.html
74 5soql2 www.housebuildersupdate.co.uk/2006/12/eco-bollocks-award-windsave-ws1000.html
74 6g2jm5 www.carbontrust.co.uk/technology/technologyaccelerator/small-wind
87 5h69fm www.thepoultrysite.com/articles/894/economic-approach-to-broiler-production
87 5pwojp www.fertilizer.org/ifa/statistics/STATSIND/pkann.asp
88 5bj8k3 www.walkerscarbonfootprint.co.uk/walkers_carbon_footprint.html
88 3s576h www.permatopia.com/transportation.html
96 6xrm5q www.edf.fr/html/en/decouvertes/voyage/usine/retour-usine.html
104 yx7zm4 www.cancentral.com/funFacts.cfm
104 r22oz www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive_charts/energy-cost/NS6Chart.html
104 yhrest www.transportation.anl.gov/pdfs/TA/106.pdf
104 y5as53 www.aluminum.org/Content/NavigationMenu/The_Industry/Government_Policy/Energy/Energy.htm
104 y2ktgg www.ssab.com/templates/Ordinary____573.aspx
105 6lbrab www.lindenau-shipyard.de/pages/newsb.html
105 5ctx4k www.wilhelmsen.com/SiteCollectionDocuments/WW_Miljorapport_engelsk.pdf
105 yqbzl3 www.normanbaker.org.uk/downloads/Supermarkets Report Final Version.doc
113 yttg7p budget2007.treasury.gov.uk/page_09.htm
113 fcqfw www.mod.uk/DefenceInternet/AboutDefence/Organisation/KeyFactsAboutDefence/DefenceSpending.htm
113 2e4fcs press.homeoffice.gov.uk/press-releases/security-prebudget-report
113 33x5kc www.mod.uk/NR/rdonlyres/95BBA015-22B9-43EF-B2DC-DFF14482A590/0/gep_200708.pdf
113 35ab2c www.dasa.mod.uk/natstats/ukds/2007/c1/table103.html
113 yg5fsj siteresources.worldbank.org/DATASTATISTICS/Resources/GDP.pdf
113 yfgjna www.sipri.org/contents/milap/milex/mex_major_spenders.pdf/download
113 slbae www.wisconsinproject.org/countries/israel/plut.html
113 yh45h8 www.usec.com/v2001_02/HTML/Aboutusec_swu.asp
113 t2948 www.world-nuclear.org/info/inf28.htm
113 2ywzee www.globalsecurity.org/wmd/intro/u-centrifuge.htm
124 uzek2 www.dti.gov.uk/energy/inform/dukes/
124 3av4s9 hdr.undp.org/en/statistics/
124 6frj55 news.independent.co.uk/environment/article2086678.ece
142 5qhvcb www.tramwayinfo.com/Tramframe.htm?www.tramwayinfo.com/tramways/Articles/Compair2.htm
148 4qgg8q www.newsweek.com/id/112733/output/print
149 5o5x5m www.cambridgeenergy.com/archive/2007-02-08/cef08feb2007kemp.pdf
149 5o5x5m www.cambridgeenergy.com/archive/2007-02-08/cef08feb2007kemp.pdf
149 5fbeg9 www.cfit.gov.uk/docs/2001/racomp/racomp/pdf/racomp.pdf
149 679rpc www.tfl.gov.uk/assets/downloads/environmental-report-2007.pdf
150 5cp27j www.eaton.com/EatonCom/ProductsServices/Hybrid/SystemsOverview/HydraulicHLA/index.htm
151 4wm2w4 www.citroenet.org.uk/passenger-cars/psa/berlingo/berlingo-electrique.html
151 658ode www.greencarcongress.com/2008/02/mitsubishi-moto.html

154 czjjo corporate.honda.com/environment/fuel_cells.aspx?id=fuel_cells_fcx
154 5a3ryx automobiles.honda.com/fcx-clarity/specifications.aspx
171 yok2nw www.eca.gov.uk/etl/find/_P_Heatpumps/detail.htm?ProductID=9868&FromTechnology=S_WaterSourcePackaged
171 2dtx8z www.eca.gov.uk/NR/rdonlyres/6754FE19-C697-49DA-B482-DA9426611ACF/0/ETCL2007.pdf
171 2fd8ar www.geothermalint.co.uk/commercial/hydronicheatpumpranges.html
177 5kpjk8 blogs.reuters.com/environment/2008/09/09/a-silver-bullet-or-just-greenwash/
177 yebuk8 www.dti.gov.uk/energy/sources/coal/index.html
177 yhxf8b www.worldenergy.org/wec-geis/publications/reports/ser/coal/coal.asp
177 e2m9n www.coal.gov.uk/resources/cleanercoaltechnologies/ucgoverview.cfm
192 5qntkb www.world-nuclear.org/info/reactors.htm
193 y3wnzr npc.sarov.ru/english/digest/132004/appendix8.html
193 32t5zt web.ift.uib.no/~lillestol/Energy_Web/EA.html
193 2qr3yr documents.cern.ch/cgi-bin/setlink?base=generic&categ=public&id=cer-0210391
193 ynk54y doc.cern.ch//archive/electronic/other/generic/public/cer-0210391.pdf
193 yl7tkm minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/1999/mcs99.pdf
193 yju4a4 www.uic.com.au/nip67.htm
193 yeyr7z taylorandfrancis.metapress.com/index/W7241163J23386MG.pdf
194 4f2ekz www.publications.parliament.uk/pa/cm199900/cmhansrd/vo000505/text/00505w05.htm
194 2k8y7o www.nei.org/resourcesandstats/
194 3pvf4j www.sustainableconcrete.org.uk/main.asp?page=210
195 4r7zpg csereport2005.bluescopesteel.com/
195 49hcnw www.ace.mmu.ac.uk/Resources/Fact_Sheets/Key_Stage_4/Waste/pdf/02.pdf
195 3kduo7 www.esrcsocietytoday.ac.uk/ESRCInfoCentre/facts/UK/index29.aspx?ComponentId=7104&SourcePageId=18130
195 69vt8r www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=7200593
195 6oby22 www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=6773271&query_id=0
195 63l2lp pubs.acs.org/cgi-bin/abstract.cgi/jacsat/2002/124/i18/abs/ja003472m.html
195 wnchw www.feasta.org/documents/wells/contents.html?one/horelacy.html
195 shrln www.enviros.com/vrepository/
223 2wmuw7 news.yahoo.com/s/ap/20071231/ap_on_hi_te/solar_roads;_ylt=AuEFouXxz16nP8MRlInTJMms0NUE
223 2hxf6c www.eirgrid.com/EirGridPortal/DesktopDefault.aspx?tabid=WindGenerationCurve&TreeLinkModID=1451&TreeLinkItemID=247
223 2l99ht www.reuters.com/article/domesticNews/idUSN2749522920080228
223 3x2kvv www.reuters.com/article/rbssIndustryMaterialsUtilitiesNews/idUSL057816620080305
224 5o2xgu www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/03-04/wind/content/storageavailable.html
224 2n3pmb www.dynamicdemand.co.uk/pdf_fridge_test.pdf
224 2k8h4o www.int.iol.co.za/index.php?art_id=vn20080201045821205C890035
224 5cp27j www.eaton.com/EatonCom/ProductsServices/Hybrid/SystemsOverview/HydraulicHLA/index.htm
224 2sxlyj www.batteryuniversity.com/partone-3.htm
224 ktd7a www.vrbpower.com/docs/news/2006/20060830-PR-TapburySale-IrelandWindfarm.pdf
224 627ced www.vrbpower.com/docs/whitepapers/SEItechpaper1.pdf
224 5fasl7 www.indexmundi.com/en/commodities/minerals/vanadium/vanadium_t7.html
224 2wmuw7 news.yahoo.com/s/ap/20071231/ap_on_hi_te/solar_roads;_ylt=AuEFouXxz16nP8MRlInTJMms0NUE
236 5os7dy tinyurl.com/5os7dy
236 yrw2oo tinyurl.com/yrw2oo
241 6eoyhg news.bbc.co.uk/1/hi/uk/7215688.stm
241 yu8em5 www.foe.co.uk/resource/reports/paying_for_better_transport.pdf
241 3x2cr4 news.bbc.co.uk/1/hi/england/london/6151176.stm
241 2dd4mz news.bbc.co.uk/1/low/uk_politics/6391075.stm
241 7vlxp www.lse.ac.uk/collections/pressAndInformationOffice/newsAndEvents/archives/2005/IDCard_FinalReport.htm
243 6x4nvu www.statoil.com/statoilcom/svg00990.nsf?opendatabase&artid=F5255D55E1E78319C1256FEF0044704B
243 39g2wz www.dillinger.de/dh/referenzen/linepipe/01617/index.shtml.en

243 3ac8sj www.hydro.com/ormenlange/en/
243 y7kg26 www.politics.co.uk/issue-briefs/economy/taxation/tobacco-duty/tobacco-duty-$366602.htm
243 r9fcf en.wikipedia.org/wiki/War_on_Drugs
244 ysncks news.bbc.co.uk/1/low/uk_politics/6205174.stm
244 2vq59t www.boston.com/news/globe/editorial_opinion/oped/articles/2007/08/01/the_63_billion_sham/
244 ym46a9 https://www.cia.gov/cia/publications/factbook/print/xx.html
244 99bpt www.guardian.co.uk/Iraq/Story/0,2763,1681119,00.html
245 2bmuod www.guardian.co.uk/environment/2007/aug/13/renewableenergy.energy
245 3g8nn8 image.guardian.co.uk/sys-files/Guardian/documents/2007/08/13/RenewablesTargetDocument.pdf
245 3jo7q2 www.viewsofscotland.org/library/docs/HoL_STC_RE_Practicalities_04.pdf
256 2ykfgw www.guardian.co.uk/environment/2007/jan/09/travelsenvironmentalimpact.greenpolitics
256 2nsvx2 www.number-10.gov.uk/output/Page10300.asp
256 yxq5xk commentisfree.guardian.co.uk/george_monbiot/2007/01/an_open_letter_to_the_prime_mi.html
264 3doaeg web.archive.org/web/20040401165322/members.cox.net/weller43/sunshine.htm
265 3lcw9c knol.google.com/k/-/-/15x31uzlqeo5n/1
276 voxbz news.bbc.co.uk/1/low/business/6247371.stm
276 yofchc news.bbc.co.uk/1/low/uk/7053903.stm
277 3e28ed www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/118.htm
287 2bhu35 www.lafn.org/~dave/trans/energy/rail_vs_auto_EE.html
291 6by8x encarta.msn.com/encyclopedia_761553622/Internal-Combustion_Engine.html
291 348whs www.cleangreencar.co.nz/page/prius-petrol-engine
297 ydt7uk www.nrel.gov/business_opportunities/pdfs/31235sow.pdf
297 yaoonz www.windpower.org/en/tour/wres/shear.htm
298 6o86ec www.londonarray.com/london-array-project-introduction/offshore/
299 6bkvbn www.timesonline.co.uk/tol/news/world/asia/article687157.ece
299 yekdaa www.windpower.org/en/stat/betzpro.htm
299 ymfbsn www.windpower.org/en/tour/wres/powdensi.htm
299 ypvbvd www.ref.org.uk/images/pdfs/UK_Wind_Phase_1_web.pdf
299 wbd8o www.ref.org.uk/energydata.php
309 33ptcg www.stevefossett.com/html/main_pages/records.html
311 6r32hf www.theaustralian.news.com.au/story/0,25197,23003236-23349,00.html
315 2af5gw www.airliners.net/info/stats.main?id=100
315 32judd www.wildanimalsonline.com/birds/wanderingalbatross.php
315 2qbquv news.bbc.co.uk/1/low/sci/tech/6988720.stm
315 5h6xph www.goldcoastyachts.com/fastcat.htm
315 4p3yco www.fas.org/man/dod-101/sys/ship/row/rus/903.htm
322 3ap7lc www.biocap.ca/files/Ont_bioenergy_OPA_Feb23_final.pdf
322 4hamks www.methanetomarkets.org/resources/landfills/docs/uk_lf_profile.pdf
331 65h3cb www.dorset-technical-committee.org.uk/reports/U-values-of-elements-Sept-2006.pdf
333 5dhups www.arct.cam.ac.uk/UCPB/Place.aspx?rid=943658&p=6&ix=8&pid=1&prcid=27&ppid=201
359 2bqapk wwwphys.murdoch.edu.au/rise/reslab/resfiles/tidal/text.html
360 r22oz www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive_charts/energy-cost/NS6Chart.html
363 3kmcks www.yourhome.gov.au/technical/index.html
364 3kmcks www.yourhome.gov.au/technical/index.html
373 3b7zdf www.communities.gov.uk/publications/planningandbuilding/generalizedlanduse
377 3av4s9 hdr.undp.org/en/statistics/
385 f754 www.archive.org/web/web.php

Bibliografia

Aitchison, E. (1996). Methane generation from UK landfill sites and its use as an energy resource. *Energy Conversion and Management*, 37(6/8):1111–1116. doi: doi:10.1016/0196-8904(95)00306-1. www.ingentaconnect.com/content/els/01968904/1996/00000037/00000006/art00306.

Amos, W. A. (2004). Updated cost analysis of photobiological hydrogen production from Chlamydomonas reinhardtii green algae – milestone completion report. www.nrel.gov/docs/fy04osti/35593.pdf.

Anderson, K., Bows, A., Mander, S., Shackley, S., Agnolucci, P., and Ekins, P. (2006). Decarbonising modern societies: Integrated scenarios process and workshops. Technical Report 48, Tyndall Centre. www.tyndall.ac.uk/research/theme2/final_reports/t3_24.pdf.

Archer, M. D. and Barber, J. (2004). Photosynthesis and photoconversion. In M. D. Archer and J. Barber, editors, *Molecular to Global Photosynthesis*. World Scientific. ISBN 978-1-86094-256-3. www.worldscibooks.com/lifesci/p218.html.

Ashworth, W. and Pegg, M. (1986). *The history of the British coal industry. Vol. 5, 1946–1982: the nationalized industry*. Clarendon, Oxford. ISBN 0198282958.

Asplund, G. (2004). Sustainable energy systems with HVDC transmission. In *Power Engineering Society General Meeting*, volume 2, pages 2299–2303. IEEE. doi: 10.1109/PES.2004.1373296. www.trec-uk.org.uk/reports/HVDC_Gunnar_Asplund_ABB.pdf.

Asselbergs, B., Bokhorst, J., Harms, R., van Hemert, J., van der Noort, L., ten Velden, C., Vervuurt, R., Wijnen, L., and van Zon, L. (2006). Size does matter – the possibilities of cultivating *jatropha curcas* for biofuel production in Cambodia. environmental.scum.org/biofuel/jatropha/.

Baer, P. and Mastrandrea, M. (2006). High stakes: Designing emissions pathways to reduce the risk of dangerous climate change. www.ippr.org/publicationsandreports/.

Bahrman, M. P. and Johnson, B. K. (2007). The ABCs of HVDC transmission technology. *IEEE Power and Energy Magazine*, 5(2).

Baines, J. A., Newman, V. G., Hanna, I. W., Douglas, T. H., Carlyle, W. J., Jones, I. L., Eaton, D. M., and Zeronian, G. (1983). Dinorwig pumped storage scheme. *Institution of Civil Engineers Proc. pt. 1*, 74:635–718.

Baines, J. A., Newman, V. G., Hanna, I. W., Douglas, T. H., Carlyle, W. J., Jones, I. L., Eaton, D. M., and Zeronian, G. (1986). Dinorwig pumped storage scheme. *Institution of Civil Engineers Proc. pt. 1*, 80:493–536.

Baker, C., Walbancke, J., and Leach, P. (2006). Tidal lagoon power generation scheme in Swansea Bay. www.dti.gov.uk/files/file30617.pdf. A report on behalf of the Dept. of Trade and Industry and the Welsh Development Agency.

Bayer Crop Science. (2003). Potential of GM winter oilseed rape to reduce the environmental impact of farming whilst improving farmer incomes. tinyurl.com/5j99df.

Bickley, D. T. and Ryrie, S. C. (1982). A two-basin tidal power scheme for the Severn estuary. In *Conf. on new approaches to tidal power*.

Binder, M., Faltenbacher, M., Kentzler, M., and Schuckert, M. (2006). Clean urban transport for Europe. deliverable D8 final report. www.fuel-cell-bus-club.com/.

Black and Veatch. (2005). The UK tidal stream resource and tidal stream technology. report prepared for the Carbon Trust Marine Energy Challenge. www.carbontrust.co.uk/technology/technologyaccelerator/tidal_stream.htm.

Blunden, L. S. and Bahaj, A. S. (2007). Tidal energy resource assessment for tidal stream generators. *Proc. IMechE*, 221 Part A: 137–146.

Bonan, G. B. (2002). *Ecological Climatology: Concepts and Applications*. Cambridge Univ. Press. ISBN 9780521804769.

Boyer, J. S. (1982). Plant productivity and environment. *Science*, 218 (4571):443–448. doi: 10.1126/science.218.4571.443.

Braslow, A. L. (1999). *A history of suction-type laminar-flow control with emphasis on flight research*. Number 13 in Monographs in Aerospace History. NASA. www.nasa.gov/centers/dryden/pdf/88792main_Laminar.pdf.

Broecker, W. S. and Kunzig, R. (2008). *Fixing Climate: What Past Climate Changes Reveal About the Current Threat–and How to Counter It*. Hill and Wang. ISBN 0809045028.

Burnham, A., Wang, M., and Wu, Y. (2007). Development and applications of GREET 2.7 — the transportation vehicle-cycle model. www.transportation.anl.gov/software/GREET/publications.html.

Carbon Trust. (2007). Micro-CHP accelerator – interim report. Technical Report CTC726. www.carbontrust.co.uk/publications/publicationdetail.htm?productid=CTC726.

Carlsson, L. (2002). "Classical HVDC: still continuing to evolve. *Modern Power Systems*.

Cartwright, D. E., Edden, A. C., Spencer, R., and Vassie, J. M. (1980). The tides of the northeast Atlantic Ocean. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. A*, 298(1436):87–139.

Catling, D. T. (1966). Principles and practice of train performance applied to London Transport's Victoria line. Paper 8, Convention on Guided Land Transport (London, 27-28 October 1966).

Charlier, R. H. (2003a). Sustainable co-generation from the tides: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7:187213.

Charlier, R. H. (2003b). A "sleeper" awakes: tidal current power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7:515529.

Charney, J. G., Arakawa, A., Baker, D. J., Bolin, B., Dickinson, R. E., Goody, R. M., Leith, C. E., Stommel, H. M., and Wunsch, C. I. (1979). Carbon dioxide and climate: A scientific assessment. www.nap.edu/catalog.php?record_id=12181.

Chisholm, S. W., Falkowski, P. G., and Cullen, J. J. (2001). Dis-crediting ocean fertilisation. *Science*, 294(5541):309–310.

Chitrakar, R., Kanoh, H., Miyai, Y., and Ooi, K. (2001). Recovery of lithium from seawater using manganese oxide adsorbent ($H_{1.6}Mn_{1.6}O_4$) derived from $Li_{1.6}Mn_{1.6}O_4$. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 40(9):2054–2058. pubs.acs.org/cgi-bin/abstract.cgi/iecred/2001/40/i09/abs/ie000911h.html.

Church, R. A., Hall, A., and Kanefsky, J. (1986). *The history of the British coal industry. Vol. 3, 1830–1913: Victorian pre-eminence*. Clarendon, Oxford. ISBN 0198282842.

Cohen, B. L. (1983). Breeder reactors: A renewable energy source. *American Journal of Physics*, 51(1):75–76. sustainablenuclear.org/PADs/pad11983cohen.pdf.

Coley, D. (2001). Emission factors for walking and cycling. www.centres.ex.ac.uk/cee/publications/reports/91.html.

Committee on Radioactive Waste Management. (2006). Managing our radioactive waste safely. www.corwm.org.uk/Pages/Current%20Publications/700%20-%20CoRWM%20July%202006%20Recommendations%20to%20Government.pdf.

CUTE. (2006). Clean urban transport for Europe. detailed summary of achievements. www.fuel-cell-bus-club.com/.

David, J. and Herzog, H. (2000). The cost of carbon capture. sequestration.mit.edu/pdf/David_and_Herzog.pdf. presented at the Fifth International Conf. on Greenhouse Gas Control Technologies, Cairns, Australia, August 13 - August 16 (2000).

Davidson, E. A. and Janssens, I. A. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440:165–173. doi: doi:10.1038/nature04514. www.nature.com/nature/journal/v440/n7081/full/nature04514.html.

Deffeyes, K. S. and MacGregor, I. D. (1980). World uranium resources. *Scientific American*, pages 66–76.

Denholm, P., Kulcinski, G. L., and Holloway, T. (2005). Emissions and energy efficiency assessment of baseload wind energy systems. *Environ Sci Technol*, 39(6):1903–1911. ISSN 0013-936X. www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=pubmed&dopt=Abstract&list_uids=15819254.

Denison, R. A. (1997). Life-cycle assessment for paper products. In E. Ellwood, J. Antle, G. Eyring, and P. Schulze, editors, *Wood in Our Future: The Role of Life-Cycle Analysis: Proc. a Symposium*. National Academy Press. ISBN 0309057450. books.nap.edu/openbook.php?record_id=5734.

Dennis, C. (2006). Solar energy: Radiation nation. *Nature*, 443:23–24. doi: 10.1038/443023a.

Dept. for Transport. (2007). Transport statistics Great Britain. www.dft.gov.uk/pgr/statistics/datatablespublications/tsgb/.

Dept. of Defense. (2008). More fight – less fuel. Report of the Defense Science Board Task Force on DoD Energy Strategy.

Dept. of Trade and Industry. (2004). DTI Atlas of UK marine renewable energy resources. www.offshore-sea.org.uk/.

Dept. of Trade and Industry. (2002a). Energy consumption in the United Kingdom. www.berr.gov.uk/files/file11250.pdf.

Dept. of Trade and Industry. (2002b). Future offshore. www.berr.gov.uk/files/file22791.pdf.

Dept. of Trade and Industry. (2007). Impact of banding the renewables obligation – costs of electricity production. www.berr.gov.uk/files/file39038.pdf.

Dessler, A. E. and Parson, E. A. (2006). *The Science and Politics of Global Climate Change – A Guide to the Debate*. Cambridge Univ. Press, Cambridge. ISBN 9780521539418.

di Prampero, P. E., Cortili, G., Mognoni, P., and Saibene, F. (1979). Equation of motion of a cyclist. *J. Appl. Physiology*, 47:201–206. jap.physiology.org/cgi/content/abstract/47/1/201.

Diamond, J. (2004). *Collapse: How Societies Choose to Fail or Succeed*. Penguin.

E4tech. (2007). A review of the UK innovation system for low carbon road transport technologies. www.dft.gov.uk/pgr/scienceresearch/technology/lctis/e4techlcpdf.

Eckhartt, D. (1995). Nuclear fuels for low-beta fusion reactors: Lithium resources revisited. *Journal of Fusion Energy*, 14(4):329–341. ISSN 0164-0313 (Print) 1572-9591 (Online). doi: 10.1007/BF02214511. www.springerlink.com/content/35470543rj8t2gk1/.

Eddington, R. (2006). Transport's role in sustaining the UK's productivity and competitiveness.

Eden, R. and Bending, R. (1985). Gas/electricity competition in the UK. Technical Report 85/6, Cambridge Energy Research Group, Cambridge.

Elliott, D. L., Wendell, L. L., and Gower, G. L. (1991). An assessment of windy land area and wind energy potential in the contiguous United States. www.osti.gov/energycitations/servlets/purl/5252760-ccu0pk/.

Energy for Sustainable Development Ltd. (2003). English partnerships sustainable energy review. www.englishpartnerships.co.uk.

Erdincler, A. U. and Vesilind, P. A. (1993). Energy recovery from mixed waste paper. *Waste Management & Research*, 11(6):507–513. doi: 10.1177/0734242X9301100605.

Etheridge, D., Steele, L., Langenfelds, R., Francey, R., Barnola, J.-M., and Morgan, V. (1998). Historical CO_2 records from the Law Dome DE08, DE08-2, and DSS ice cores. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Dept. of Energy, Oak Ridge, Tenn., USA. cdiac.ornl.gov/trends/co2/lawdome.html.

European Commission. (2007). Concentrating solar power - from research to implementation. www.solarpaces.org/Library/library.htm.

Evans, D. G. (2007). Liquid transport biofuels – technology status report. www.nnfcc.co.uk/.

Evans, R. K. (2008). An abundance of lithium. www.worldlithium.com.

Faber, T. E. (1995). *Fluid dynamics for physicists*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.

Faiman, D., Raviv, D., and Rosenstreich, R. (2007). Using solar energy to arrest the increasing rate of fossil-fuel consumption: The southwestern states of the USA as case studies. *Energy Policy*, 35:567576.

Fies, B., Peterson, T., and Powicki, C. (2007). Solar photovoltaics – expanding electric generation options. mydocs.epri.com/docs/SEIG/1016279_Photovoltaic_White_Paper_1207.pdf.

Fisher, K., Wallén, E., Laenen, P. P., and Collins, M. (2006). Battery waste management life cycle assessment. www.defra.gov.uk/environment/waste/topics/batteries/pdf/erm-lcareport0610.pdf.

Flather, R. A. (1976). A tidal model of the north-west European continental shelf. *Memoires Société Royale des Sciences de Liège*, 10 (6):141–164.

Flinn, M. W. and Stoker, D. (1984). *The history of the British coal industry. Vol. 2, 1700–1830: the Industrial Revolution*. Clarendon, Oxford. ISBN 0198282834.

Francis, G., Edinger, R., and Becker, K. (2005). A concept for simultaneous wasteland reclamation, fuel production, and socio-economic development in degraded areas in India: Need, potential and perspectives of Jatropha plantations. *Natural Resources Forum*, 29(1):12–24. doi: 10.1111/j.1477-8947.2005.00109.x.

Franklin, J. (2007). Principles of cycle planning. www.cyclenetwork.org.uk/papers/071119principles.pdf.

Freeston, D. H. (1996). Direct uses of geothermal energy 1995. geoheat.oit.edu/bulletin/bull17-1/art1.pdf.

Gabrielli, G. and von Kármán, T. (1950). What price speed? *Mechanical Engineering*, 72(10).

Garrett, C. and Cummins, P. (2005). The power potential of tidal currents in channels. *Proc. Royal Society A*, 461(2060):2563–2572. dx.doi.org/10.1098/rspa.2005.1494.

Garrett, C. and Cummins, P. (2007). The efficiency of a turbine in a tidal channel. *J Fluid Mech*, 588:243–251. journals.cambridge.org/production/action/cjoGetFulltext?fulltextid=1346064.

Gellings, C. W. and Parmenter, K. E. (2004). Energy efficiency in fertilizer production and use. In C. W. Gellings and K. Blok, editors, *Efficient Use and Conservation of Energy*, Encyclopedia of Life Support Systems. Eolss Publishers, Oxford, UK. www.eolss.net.

German Aerospace Center (DLR) Institute of Technical Thermodynamics Section Systems Analysis and Technology Assessment. (2006). Concentrating solar power for the Mediterranean region. www.dlr.de/tt/med-csp. Study commissioned by Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, Germany.

Goodstein, D. (2004). *Out of Gas*. W. W. Norton and Company, New York. ISBN 0393058573.

Green, J. E. (2006). Civil aviation and the environment – the next frontier for the aerodynamicist. *Aeronautical Journal*, 110(1110): 469–486.

Grubb, M. and Newbery, D. (2008). Pricing carbon for electricity generation: national and international dimensions. In M. Grubb, T. Jamasb, and M. G. Pollitt, editors, *Delivering a Low Carbon Electricity System: Technologies, Economics and Policy*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.

Gummer, J., Goldsmith, Z., Peck, J., Eggar, T., Hurd, N., Miraj, A., Norris, S., Northcote, B., Oliver, T., Strong, D., Twitchen, K., and Wilkie, K. (2007). Blueprint for a green economy. www.qualityoflifechallenge.com.

Halkema, J. A. (2006). Wind energy: Facts and fiction. www.countryguardian.net/halkema-windenergyfactfiction.pdf.

Hammond, G. and Jones, C. (2006). Inventory of carbon & energy (ICE). www.bath.ac.uk/mech-eng/sert/embodied/. version 1.5a Beta.

Hammons, T. J. (1993). Tidal power. *Proc. IEEE*, 8(3):419–433.

Hansen, J., Sato, M., Kharecha, P., Russell, G., Lea, D., and Siddall, M. (2007). Climate change and trace gases. *Phil. Trans. Royal. Soc. A*, 365:1925–1954. doi: 10.1098/rsta.2007.2052. pubs.giss.nasa.gov/abstracts/2007/Hansen_etal_2.html.

Hastings, R. and Wall, M. (2006). *Sustainable Solar Housing: Strategies And Solutions*. Earthscan. ISBN 1844073254.

Hatcher, J. (1993). *The History of the British Coal Industry: Towards the Age of Coal: Before 1700 Vol 1*. Clarendon Press.

Heaton, E., Voigt, T., and Long, S. (2004). A quantitative review comparing the yields of two candidate C4 perennial biomass crops in relation to nitrogen, temperature, and water. *Biomass and Bioenergy*, 27:21–30.

Helm, D., Smale, R., and Phillips, J. (2007). Too good to be true? The UK's climate change record. www.dieterhelm.co.uk/publications/Carbon_record_2007.pdf.

Helweg-Larsen, T. and Bull, J. (2007). Zero carbon Britain – an alternative energy strategy. zerocarbonbritain.com/.

Herring, J. (2004). Uranium and thorium resource assessment. In C. J. Cleveland, editor, *Encyclopedia of Energy*. Boston Univ., Boston, USA. ISBN 0-12-176480-X.

Herzog, H. (2003). Assessing the feasibility of capturing co_2 from the air. web.mit.edu/coal/working_folder/pdfs/Air_Capture_Feasibility.pdf.

Herzog, H. (2001). What future for carbon capture and sequestration? *Environmental Science and Technology*, 35:148A–153A. sequestration.mit.edu/.

Hird, V., Emerson, C., Noble, E., Longfield, J., Williams, V., Goetz, D., Hoskins, R., Paxton, A., and Dupee, G. (1999). Still on the road to ruin? An assessment of the debate over the unnecessary transport of food, five years on from the food miles report.

Hodgson, P. (1999). *Nuclear Power, Energy and the Environment*. Imperial College Press.

Hopfield, J. J. and Gollub, J. (1978). Introduction to solar energy. www.inference.phy.cam.ac.uk/sustainable/solar/HopfieldGollub78/scan.html.

Horie, H., Tanjo, Y., Miyamoto, T., and Koga, Y. (1997). Development of a lithium-ion battery pack system for EV. *JSAE Review*, 18 (3):295–300.

HPTCJ. (2007). Heat pumps: Long awaited way out of the global warming. www.hptcj.or.jp/about_e/contribution/index.html.

Indermuhle, A., Stocker, T., Joos, F., Fischer, H., Smith, H., Wahlen, M., Deck, B., Mastroianni, D., Tschumi, J., Blunier, T., Meyer, R., and Stauffer, B. (1999). Holocene carbon-cycle dynamics based on CO_2 trapped in ice at Taylor Dome, Antarctica. *Nature*, 398:121–126.

International Energy Agency. (2001). Things that go blip in the night – standby power and how to limit it. www.iea.org/textbase/nppdf/free/2000/blipinthenight01.pdf.

Jackson, P. and Kershaw, S. (1996). Reducing long term methane emissions resulting from coal mining. *Energy Conversion and Management*, 37(6-8):801–806. doi: 10.1016/0196-8904(95)00259-6.

Jevons, W. S. (1866). *The Coal Question; An Inquiry concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of our Coal-mines*. Macmillan and Co., London, second edition. oll.libertyfund.org/.

Jones, I. S. F. (2008). The production of additional marine protein by nitrogen nourishment. www.oceannourishment.com/files/Jc08.pdf.

Jones, P. M. S. (1984). Statistics and nuclear energy. *The Statistician*, 33(1):91–102. www.jstor.org/pss/2987717.

Judd, B., Harrison, D. P., and Jones, I. S. F. (2008). Engineering ocean nourishment. In *World Congress on Engineering WCE 2008*, pages 1315–1319. IAENG. ISBN 978-988-98671-9-5.

Juniper, T. (2007). *How Many Lightbulbs does it take To Change a Planet?* Quercus, London.

Kammen, D. M. and Hassenzahl, D. M. (1999). *Should We Risk It? Exploring Environmental, Health, and Technological Problem Solving*. Princeton Univ. Press.

Kaneko, T., Shimada, M., Kujiraoka, S., and Kojima, T. (2004). Easy maintenance and environmentally-friendly train traction system. *Hitachi Review*, 53(1):15–19. www.hitachi.com/ICSFiles/afieldfile/2004/05/25/r2004_01_103.pdf.

Keeling, C. and Whorf, T. (2005). Atmospheric CO_2 records from sites in the SIO air sampling network. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Dept. of Energy, Oak Ridge, Tenn., USA.

Keith, D. W., Ha-Duong, M., and Stolaroff, J. K. (2005). Climate strategy with CO_2 capture from the air. *Climatic Change*. doi: 10.1007/s10584-005-9026-x. www.ucalgary.ca/~keith/papers/51.Keith.2005.ClimateStratWithAirCapture.e.pdf.

King, J. (2007). The King review of low-carbon cars. Part I: the potential for CO_2 reduction. hm-treasury.gov.uk/king.

King, J. (2008). The King review of low-carbon cars. Part II: recommendations for action. hm-treasury.gov.uk/king.

Koomey, J. G. (2007). Estimating total power consumption by servers in the US and the world. blogs.business2.com/greenwombat/files/serverpowerusecomplete-v3.pdf.

Kowalik, Z. (2004). Tide distribution and tapping into tidal energy. *Oceanologia*, 46(3):291–331.

Kuehr, R. (2003). *Computers and the Environment: Understanding and Managing their Impacts (Eco-Efficiency in Industry and Science)*. Springer. ISBN 1402016808.

Lackner, K. S., Grimes, P., and Ziock, H.-J. (2001). Capturing carbon dioxide from air. www.netl.doe.gov/publications/proceedings/01/carbon_seq/7b1.pdf. Presented at First National Conf. on Carbon Sequestration, Washington DC.

Lawson, B. (1996). Building materials, energy and the environment: Towards ecologically sustainable development.

Layzell, D. B., Stephen, J., and Wood, S. M. (2006). Exploring the potential for biomass power in Ontario. www.biocap.ca/files/Ont_bioenergy_OPA_Feb23_final.pdf.

Le Quéré, C., Rödenbeck, C., Buitenhuis, E., Conway, T. J., Langenfelds, R., Gomez, A., Labuschagne, C., Ramonet, M., Nakazawa, T., Metzl, N., Gillett, N., and Heimann, M. (2007). Saturation of the southern ocean CO_2 sink due to recent climate change. *Science*, 316:1735–1738. doi: 10.1126/science.1136188. lgmacweb.env.uea.ac.uk/e415/publications.html.

Lemofouet-Gatsi, S. (2006). *Investigation and optimisation of hybrid electricity storage systems based on compressed air and supercapacitors.* PhD thesis, EPFL. library.epfl.ch/theses/?nr=3628.

Lemofouet-Gatsi, S. and Rufer, A. (2005). Hybrid energy systems based on compressed air and supercapacitors with maximum efficiency point tracking. leiwww.epfl.ch/publications/lemofouet_rufer_epe_05.pdf.

Lomborg, B. (2001). *The skeptical environmentalist: measuring the real state of the world*. Cambridge Univ. Press, Cambridge. ISBN 0-521-80447-7.

Mabee, W. E., Saddler, J. N., Nielsen, C., Henrik, L., and Steen Jensen, E. (2006). Renewable-based fuels for transport. www.risoe.dk/rispubl/Energy-report5/ris-r-1557_49-52.pdf. Riso Energy Report 5.

MacDonald, J. M. (2008). The economic organization of US broiler production. www.ers.usda.gov/Publications/EIB38/EIB38.pdf. Economic Information Bulletin No. 38. Economic Research Service, US Dept. of Agriculture.

MacDonald, P., Stedman, A., and Symons, G. (1992). The UK geothermal hot dry rock R&D programme. In *Seventeenth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*.

MacKay, D. J. C. (2007a). Enhancing electrical supply by pumped storage in tidal lagoons. www.inference.phy.cam.ac.uk/mackay/abstracts/Lagoons.html.

MacKay, D. J. C. (2007b). Under-estimation of the UK tidal resource. www.inference.phy.cam.ac.uk/mackay/abstracts/TideEstimate.html.

MacLeay, I., Harris, K., and Michaels, C. (2007). Digest of United Kingdom energy statistics 2007. www.berr.gov.uk.

Malanima, P. (2006). Energy crisis and growth 1650–1850: the European deviation in a comparative perspective. *Journal of Global History*, 1:101–121. doi: 10.1017/S1740022806000064.

Marland, G., Boden, T., and Andres, R. J. (2007). Global, regional, and national CO_2 emissions. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Dept. of Energy, Oak Ridge, Tenn., USA. cdiac.ornl.gov/trends/emis/tre_glob.htm.

Massachusetts Institute of Technology. (2006). The future of geothermal energy. geothermal.inel.gov/publications/future_of_geothermal_energy.pdf.

McBride, J. P., Moore, R. E., Witherspoon, J. P., and Blanco, R. E. (1978). Radiological impact of airborne effluents of coal and nu-

clear plants. *Science*, 202(4372):1045–1050. doi: 10.1126/science.202.4372.1045.

Meadows, M. (1996). Estimating landfill methane emissions. *Energy Conversion and Management*, 37(6-8):1099–1104. doi: 10.1016/0196-8904(95)00304-5.

B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos, and L. Meyer, editors. (2005). *Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. Cambridge Univ. Press, Cambridge. ISBN 978-0-521-68551-1. www.ipcc.ch/ipccreports/srccs.htm.

Mills, D. R. and Lièvre, P. L. (2004). Competitive solar electricity. www.ausra.com/pdfs/Paper_CompetitiveSolarElectricity.pdf.

Mills, D. R. and Morgan, R. G. (2008). Solar thermal electricity as the primary replacement for coal and oil in US generation and transportation. www.ausra.com/technology/reports.html.

Mills, D. R. and Morrison, G. L. (2000). Compact Linear Fresnel Reflector solar thermal powerplants. *Solar Energy*, 68(3):263–283. doi: 10.1016/S0038-092X(99)00068-7.

Mills, D. R., Le Lièvre, P., and Morrison, G. L. (2004). First results from Compact Linear Fresnel Reflector installation. solarheatpower.veritel.com.au/MILLS_CLFR_ANZSES_FINAL.pdf.

Mindl, P. (2003). Hybrid drive super-capacitor energy storage calculation. www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2003/Supcap6_EDPE.pdf.

Mollison, D. (1986). Wave climate and the wave power resource. In D. Evans and A. de O. Falcao, editors, *Hydrodynamic of Ocean Wave-Energy Utilization*, pages 133–156, Berlin. Springer. www.ma.hw.ac.uk/~denis/wave.html.

Mollison, D. (1991). The UK wave power resource. In *Wave Energy (Institution of Mechanical Engineers – Seminar)*, pages 1–6. John Wiley & Sons. www.ma.hw.ac.uk/~denis/wave.html.

Mollison, D., Buneman, O. P., and Salter, S. H. (1976). Wave power availability in the NE Atlantic. *Nature*, 263(5574):223–226. www.ma.hw.ac.uk/~denis/wave.html.

Monteith, J. L. (1977). Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philos. Trans. R. Soc. London*, 281:277–294.

National Bureau of Economic Research. (2001). NBER macrohistory database. www.nber.org/databases/macrohistory/contents/.

Neftel, A., Friedli, H., Moor, E., Lötscher, H., Oeschger, H., Siegenthaler, U., and Stauffer, B. (1994). Historical CO_2 record from the Siple station ice core. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Dept. of Energy, Oak Ridge, Tenn., USA. cdiac.ornl.gov/trends/co2/siple.htm.

Netherlands Environmental Assessment Agency. (2006). History database of the global environment. www.mnp.nl/hyde/.

Nickol, C. L. (2008). Silent Aircraft Initiative concept risk assessment. ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20080012497_2008011089.pdf.

Norrström, H. (1980). Low waste technology in pulp and paper industries. *Pure & Appl. Chem.*, 52:1999–2004. www.iupac.org/publications/pac/1980/pdf/5208x1999.pdf.

Nuttall, W. J. (2004). *Nuclear Renaissance*. Institute of Physics Publishing.

OECD Nuclear Energy Agency. (2006). *Forty Years of Uranium Resources, Production and Demand in perspective*. OECD Publishing. ISBN 9264028064. books.google.com/books?id=HIT1o985uKYC.

Ongena, J. and Van Oost, G. (2006). Energy for future centuries. Will fusion be an inexhaustible, safe and clean energy source? www.fusie-energie.nl/artikelen/ongena.pdf.

Oswald, J., Raine, M., and Ashraf-Ball, H. (2008). Will British weather provide reliable electricity? *Energy Policy*, in press. doi: 10.1016/j.enpol.2008.04.03.

Price, R. and Blaise, J. (2002). Nuclear fuel resources: Enough to last? www.ingentaconnect.com/content/oecd/16059581/2002/00000020/00000002/6802021e.

Putt, R. (2007). Algae as a biodiesel feedstock: A feasibility assessment. www.eere.energy.gov/afdc/pdfs/algae.pdf.

Quayle, R. G. and Changery, M. J. (1981). Estimates of coastal deepwater wave energy potential for the world. *Oceans*, 13:903–907. ieeexplore.ieee.org/iel6/8271/25889/01151590.pdf.

Rice, T. and Owen, P. (1999). *Decommissioning the Brent Spar*. Taylor and Francis.

Richards, B. S. and Watt, M. E. (2007). Permanently dispelling a myth of photovoltaics via the adoption of a new net energy indicator. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(1):162172. www.sciencedirect.com/science/journal/13640321.

Richards, H. G., Parker, R. H., Green, A. S. P., Jones, R. H., Nicholls, J. D. M., Nicol, D. A. C., Randall, M. M., Richards, S., Stewart, R. C., and Willis-Richards, J. (1994). The performance and characteristics of the experimental hot dry rock geothermal reservoir at Rosemanowes, Cornwall (1985-1988). *Geothermics*, 23 (2):73–109. ISSN 0375-6505.

Ridley, T. M. and Catling, D. T. (1982). The energy implications of the design of mass transit railways. Presented at Tunnelling '82 (Third International Symposium), Brighton.

Rogner, H.-H. (2000). Energy resources. In *World Energy Assessment – Energy and the challenge of sustainability*, chapter 5. UNDP, New York, USA. www.undp.org/energy/activities/wea/draft-start.html.

Ross, A. (2008). The Loch Sloy hydro-electric scheme 1950. www.arrocharheritage.com/LochSloyHydroElectricScheme.htm.

Royal Commission on Environmental Pollution. (2004). Biomass as a renewable energy source. www.rcep.org.uk.

Royal Society working group on biofuels. (2008). Sustainable biofuels: prospects and challenges. royalsociety.org. Policy document 01/08.

Rubbia, C., Rubio, J., Buono, S., Carminati, F., Fiétier, N., Galvez, J., Gelès, C., Kadi, Y., Klapisch, R., Mandrillon, P., Revol, J., and Roche, C. (1995). Conceptual design of a fast neutron operated high power energy amplifier. Technical Report CERN/AT/95-44 (ET), European Organization for Nuclear Research. doc.cern.ch//archive/electronic/other/generic/public/cer-0210391.pdf.

Ruddell, A. (2003). Investigation on storage technologies for intermittent renewable energies: Evaluation and recommended r&d strategy. www.itpower.co.uk/investire/pdfs/flywheelrep.pdf.

Rydh, C. J. and Karlström, M. (2002). Life cycle inventory of recycling portable nickel-cadmium batteries. *Resources, Conservation and Recycling*, 34:289–309. homepage.te.hik.se/personal/tryca/battery/abstracts.htm.

Salter, S. H. (2005). Possible under-estimation of the UK tidal resource. www.berr.gov.uk/files/file31313.pdf. Submission for DTI Energy Review.

Schellnhuber, H. J., Cramer, W., Nakicenovic, N., Wigley, T., and Yohe, G. (2006). *Avoiding Dangerous Climate Change*. Cambridge Univ. Press. www.defra.gov.uk/environment/climatechange/internat/pdf/avoid-dangercc.pdf.

Schiermeier, Q., Tollefson, J., Scully, T., Witze, A., and Morton, O. (2008). Energy alternatives: Electricity without carbon. *Nature*, 454:816–823. doi: 10.1038/454816a.

Schlaich, J., Bergermann, R., W, S., and G, W. (2005). Design of commercial solar updraft tower systems – utilization of solar induced convective flows for power generation. *Journal of Solar Energy Engineering*, 127(1):117–124. doi: 10.1115/1.1823493. www.sbp.de/de/html/contact/download/The_Solar_Updraft.pdf.

Schlaich J, S. W. *Solar Chimneys*. Academic Press, London, 3rd edition, (2001). ISBN 0-12-227410-5. \url{www.solarmillennium.de/pdf/SolarCh.pdf}. www.solarmillennium.de/pdf/SolarCh.pdf.

Schmer, M. R., Vogel, K. P., Mitchell, R. B., and Perrin, R. K. (2008). Net energy of cellulosic ethanol from switchgrass. *PNAS*, 105(2):464–469. doi: 10.1073/pnas.0704767105. www.pnas.org/cgi/content/full/105/2/464.

Schuiling, R. and Krijgsman, P. (2006). Enhanced weathering; an effective and cheap tool to sequester co$_2$. *Climatic Change*, 74(1-3): 349–354.

S. I. Schwartz, editor. (1998). *Atomic Audit: Costs and Consequences of US Nuclear Weapons Since 1940*. Brookings Institution Press, Washington, D.C. www.brook.edu/fp/projects/nucwcost/schwartz.htm.

Seko, N., Katakai, A., Hasegawa, S., Tamada, M., Kasai, N., Takeda, H., Sugo, T., and Saito, K. (2003). Aquaculture of uranium in seawater by a fabric-adsorbent submerged system. *Nuclear Technology*, 144(2):274–278.

Shapouri, H., Duffield, J. A., and Graboski, M. S. (1995). Estimating the net energy balance of corn ethanol. www.ethanol-gec.org/corn_eth.htm. United States Dept. of Agriculture Agricultural Economic Report Number 721.

Sharman, H. (2005). Why wind power works for Denmark. *Proc. ICE Civil Engineering*, 158:6672. incoteco.com/upload/CIEN.158.2.66.pdf.

Shaw, T. L. and Watson, M. J. (2003a). The effects of pumping on the energy potential of a tidal power barrage. *Engineering Sustainability*, 156(2):111–117. ISSN 1478-4637. doi: 10.1680/ensu.156.2.111.37018.

Shaw, T. L. and Watson, M. J. (2006). Flexible power generation from a Severn barrage. www.dti.gov.uk/files/file31332.pdf.

Shaw, T. L. and Watson, M. J. (2003b). Flexible power generation from the tides. *Engineering Sustainability*, 156(2):119–123. ISSN 1478-4629.

Shepherd, D. W. (2003). *Energy Studies*. Imperial College Press.

Shockley, W. and Queisser, H. J. (1961). Detailed balance limit of efficiency of *p–n* junction solar cells. *Journal of Applied Physics*, 32 (3):510–519.

Shyy, W., Berg, M., and Ljungqvist, D. (1999). Flapping and flexible wings for biological and micro air vehicles. *Progress in Aerospace Sciences*, 35(5):455–505.

Siegenthaler, U., Monnin, E., Kawamura, K., Spahni, R., Schwander, J., Stauffer, B., Stocker, T., Barnola, J.-M., and Fischer, H. (2005). Supporting evidence from the EPICA Dronning Maud Land ice core for atmospheric CO_2 changes during the past millennium. *Tellus B*, 57(1):51–57. doi: 10.1111/j.1600-0889.2005.00131.x. ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/icecore/antarctica/maud/edml-co2-2005.xls.

Sims, R., Schock, R., Adegbululgbe, A., Fenhann, J., Konstantinaviciute, I., Moomaw, W., Nimir, H., Schlamadinger, B., Torres-Martínez, J., Turner, C., Uchiyama, Y., Vuori, S., Wamukonya, N., and Zhang, X. (2007). Energy supply. In B. Metz, O. Davidson, P. Bosch, R. Dave, , and L. Meyer, editors, *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge Univ. Press, Cambridge. www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg3/ar4-wg3-chapter4.pdf.

Sinden, G. (2005). Variability of UK marine resources. Technical report, Oxford. www.carbontrust.co.uk/NR/rdonlyres/EC293061-611D-4BC8-A75C-9F84138184D3/0/variability_uk_marine_energy_resources.pdf.

Sleath, J. F. A. (1984). *Sea bed mechanics*. Wiley, New York. ISBN 047189091X.

Socolow, R. (2006). Stabilization wedges: An elaboration of the concept. In H. J. Schellnhuber, W. Cramer, N. Nakicenovic, T. Wigley, and G. Yohe, editors, *Avoiding Dangerous Climate Change*. Cambridge Univ. Press.

Steinberg, M. and Dang, V. (1975). Preliminary design and analysis of a process for the extraction of lithium from seawater. Technical Report 20535-R, Brookhaven National Lab., Upton, N.Y. (USA). www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=7351225. Presented at Symposium on United States lithium resources and requirements by the year 2000; 22 Jan 1976; Lakewood, CO, USA.

Stern, N. (2007). *The Economics of Climate Change*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.

Subcommittee on Poultry Nutrition, National Research Council. (1994). *Nutrient Requirements of Poultry*. National Academy Press, Washington, ninth revised edition edition. www.nap.edu/openbook.php?isbn=0309048923.

Supple, B. (1987). *The history of the British coal industry. Vol. 4, 1913–1946: the political economy of decline*. Clarendon, Oxford. ISBN 019828294X.

Taylor, G. I. (1920). Tidal friction in the Irish Sea. *R. Soc. Lond. Ser. A*, 220:1–33. doi: 10.1098/rsta.1920.0001.

Taylor, G. K. (2002a). Are you missing the boat? the ekranoplan in the 21st century – its possibilities and limitations. www.hypercraft-

associates.com/areyoumissingtheboat2002.pdf. Presented at the 18th Fast Ferry Conf., Nice, France.

Taylor, S. J. (2002b). The Severn barrage – definition study for a new appraisal of the project. www.dti.gov.uk/files/file15363.pdf. ETSU REPORT NO. T/09/00212/00/REP.

Tennekes, H. (1997). *The Simple Science of Flight*. MIT Press.

Thakur, P. C., Little, H. G., and Karis, W. G. (1996). Global coalbed methane recovery and use. *Energy Conversion and Management*, 37 (6/8):789–794.

The Earthworks Group. (1989). *50 Simple things you can do to save the earth*. The Earthworks Press, Berkeley, California. ISBN 0-929634-06-3.

Treloar, G. J., Love, P. E. D., and Crawford, R. H. (2004). Hybrid life-cycle inventory for road construction and use. *J. Constr. Engrg. and Mgmt.*, 130(1):43–49.

Trieb, F. and Knies, G. (2004). A renewable energy and development partnership EU-ME-NA for large scale solar thermal power and desalination in the Middle East and in North Africa. www.gezen.nl/wordpress/wp-content/uploads/2006/09/sanaa-paper-and-annex_15-04-2004.pdf.

Tsuruta, T. (2005). Removal and recovery of lithium using various microorganisms. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 100(5):562–566. www.jstage.jst.go.jp/article/jbb/100/5/100_562/_article.

Turkenburg, W. C. (2000). Renewable energy technologies. In *World Energy Assessment – Energy and the challenge of sustainability*, chapter 7. UNDP, New York, USA. www.undp.org/energy/activities/wea/draft-start.html.

Ucuncu, A. (1993). Energy recovery from mixed paper waste. Technical report, NC, USA. www.p2pays.org/ref/11/10059.pdf.

Van den Berg, G. (2004). Effects of the wind profile at night on wind turbine sound. *Journal of Sound and Vibration*, 277:955–970. www.nowap.co.uk/docs/windnoise.pdf.

van Voorthuysen, E. d. M. (2008). Two scenarios for a solar world economy. *Int. J. Global Environmental Issues*, 8(3):233247.

Ventour, L. (2008). The food we waste. news.bbc.co.uk/1/shared/bsp/hi/pdfs/foodwewaste_fullreport08_05_08.pdf.

Warwick HRI. (2007). Direct energy use in agriculture: opportunities for reducing fossil fuel inputs. www2.warwick.ac.uk/fac/sci/whri/research/climatechange/energy/direct_energy__use_in_agriculture.pdf.

Water UK. (2006). Towards sustainability 2005–2006. www.water.org.uk/home/policy/reports/sustainability/indicators-2005-06/towards-sustainability-2005-2006.pdf.

Watson, J., Hertin, J., Randall, T., and Gough, C. (2002). Renewable energy and combined heat and power resources in the UK. Technical report. www.tyndall.ac.uk/publications/working_papers/wp22.pdf. Working Paper 22.

Wavegen. (2002). Islay Limpet project monitoring – final report. www.wavegen.co.uk/pdf/art.1707.pdf.

Weber, C. L. and Matthews, H. S. (2008). Food-miles and the relative climate impacts of food choices in the United States. *Environ. Sci. Technol.*, 42(10):3508–3513. doi: 10.1021/es702969f.

Weightman, M. (2007). Report of the investigation into the leak of dissolver product liquor at the Thermal Oxide Reprocessing Plant (THORP), Sellafield, notified to HSE on 20 April 2005. www.hse.gov.uk/nuclear/thorpreport.pdf.

Wiedmann, T., Wood, R., Lenzen, M., Minx, J., Guan, D., and Barrett, J. (2008). Development of an embedded carbon emissions indicator producing a time series of input-output tables and embedded carbon dioxide emissions for the UK by using a MRIO data optimisation system. randd.defra.gov.uk/Document.aspx?Document=EV02033_7331_FRP.pdf.

Williams, D. and Baverstock, K. (2006). Chernobyl and the future: Too soon for a final diagnosis. *Nature*, 440:993–994. doi: 10.1038/440993a.

Williams, E. (2004). Energy intensity of computer manufacturing: hybrid assessment combining process and economic input-output methods. *Environ Sci Technol*, 38(22):6166–6174. ISSN 0013-936X. \url{www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=pubmed&dopt=Abstract&list_uids=15573621}.

Williams, R. H. (2000). Advanced energy supply technologies. In *World Energy Assessment – Energy and the challenge of sustainability*, chapter 8. UNDP, New York, USA. www.undp.org/energy/activities/wea/draft-start.html.

Wilson, E. M. and Balls, M. (1990). Tidal power generation. In P. Novak, editor, *Developments in Hydraulic Engineering*, chapter 2. Taylor & Francis. ISBN 185166095X.

Wood, B. (1985). Economic district heating from existing turbines. *Institution of Civil Engineers Proc. pt. 1*, 77:27–48.

Yaros, B. (1997). Life-cycle thinking for wood and paper products. In E. Ellwood, J. Antle, G. Eyring, and P. Schulze, editors, *Wood in Our Future: The Role of Life-Cycle Analysis: Proc. a Symposium*.

Zaleski, C. P. (2005). The future of nuclear power in France, the EU and the world for the next quarter-century. www.npec-web.org/Essays/Essay050120Zalenski-FutureofNuclearPower.pdf. tinyurl.com/32louu.

Zhu, X.-G., Long, S. P., and Ort, D. R. (2008). What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass? *Current Opinion in Biotechnology*, 19:153159.

Indice analitico

λ, 344
13 ampere, 56

747, 146
1698, 8, 23
1769, 8
1910, 8
1979, 24
2050, 225

grado kelvin, 323

a barre, 58
a tre ruote, 152
A380, 146
abbandonare il Titanic, 75
acciaio, 98, 104, 363
    energia incorporata, 104
Acciaio inossidabile , 363
Acciaio zincato, 363
accumulo mediante pompaggio, 210
acqua, 29, 56
    bollente, 31
    calda, 56
    calda solare, 227
    costo di, 102
    desalinizzazione, 102
    di mare, 102, 103, 179, 183, 191, 193, 195
    estrazione dell'uranio, 182, 193
    energia incorporata, 105
    poco profonda, 346
Acque territoriali del Regno Unito, 68
Adelman, Kenneth, 45
aerei
    imbarcazioni come esempio di, 311
    miglioramento dell'efficienza, 42
aereo, 40, 146
    consumo di energia, 101
    turboelica, 41
aerogeneratore, 297
aerostato, 313
affermazioni etiche, 21
affermazioni fattuali, 20
aggeggio, 76
Airbus, 146
Aircar, 142
albatros, 304
albedo
    retroazione positiva, 271
alberi, 49, 55, 317
    artificiali, 277
Albert Hall, 372
alchimia, 97
Algeria, 197, 380
alghe, 318, 319, 322
    biocarburante, 319
    idrogeno, 319
alghe verdi, 319, 322
aliscafo, 311, 312
alluminio 107, 363
    energia incorporata, 104
    Islanda, 203
    lattine, 98
Alpi, 232
altezza, del volo, 309
altitudine, 304
altruismo, 6
America, 25, 102, 379
Americano, 115, 260
Amonix, 201
amore, 5
ampere, 56
Amplificatore, 77
analisi del ciclo di vita, 97, 144, 362
analogia, 29
anatra, Salter, 345
Andasol, 197, 204
anidride carbonica, 23, 24
    cambiamento climatico, 7
    dati, 7, 10
    effetto serra, 7
    equivalente, 13
apertura alare, 301
apparato militare statunitense, 113
Aptera, 151
Aquamarine Power Ltd, 346
aquile, 71
aquile dalla coda bianca, 71
Arabia Saudita, 8, 197, 244, 380
arancia, 106
area, 61, 373
    frontale, 132
area frontale, 132
area petrolifera, 72
Argentina, 263
argilla, 363
aria calda, 57
aria che ci circonda, 267
aria condizionata, 58, 159, 168
    nei veicoli, 145
aria in movimento, 283
Arizona, 201, 262, 319, 322
armi, 244
arseniuro di gallio, 45
Artemis Intelligent Power, 138
asciugabiancheria, 57
asciugacapelli, 97
aspirapolvere, 78
aspiratore gigante, 271
assicurazione, 241
assoluzione, 4
astronave, 34, 283
Atlantico, 80
atmosfera, 12
Atomi per la Pace, 147
atti in difesa del consumo, 5
attrito volvente, 287
aumento del livello del mare, 12, 20
aumento della popolazione, 8
Ausra, 204
Australia, 263, 379
auto, 130, 283
    elettrica, 139
    ibrida, 139
    pesce, 151
    rifornimento, 291
auto ad idrogeno, 141, 143, 154
auto ecologica, 131
auto elettrica, 141
    autonomia, 290, 291
    dati, 140
    emissioni di CO_2, 144
    modello teorico, 290
    ricarica, 291
auto ibride, 139
    messe a confronto, 139
    pubblicità ingannevole, 139
autobus, 141
autobus a due piani, 372, 373
Autobus marino, 132
automobile, 34, *vedi* car
    auto ecologica, 131
    energia incorporata, 104
automobili
    fabbricazione, 104
    luci, 64
Automobili tolte dalla strada, 370
autonomia di crociera
    di un uccello, 308
autorità garante per lo standard pubblicitario, 139
autostrada, 241
avena, 320
aviazione
    futuro della, 146
azione, 225
azoto, 304

B&Q, 74
bacini per le maree, 91
bacino, 90
bacino per le maree, 91
Baer, 17
bagno, 56, 57
Bangladesh, 379
barbabietola da zucchero, 317
Barbados, 256
barca
    consumo di energia, 101
barca ecologica, 141
batimetria, 68
batteria, 152
    densità di energia, 221
    efficienza, 224
    litio-sulfuro, 224
batteria a pila
    ricaricabile, 104
batteria agli ioni di litio
    efficienza, 224
batteria al nickel cadmio
    densità di energia, 221
batteria alcalina
    densità di energia, 221
batteria NiMH
    densità di energia, 221
batteria piombo-acido
    densità di energia, 221
    efficienza, 224
batteria polimero ioni di litio
    densità di energia, 221
batterie, 227
    densità energetica, 291
batterie agli ioni di litio
    densità di energia, 221
Baviera, 46, 54, 239
BBC, 75, 79
Beatrice, 72
Bedford, 61
Belgio, 25, 231
Bene contro il Male, 111
beni di consumo, 97
benzina, 36
Berlingo, 140
Betz, Albert, 294
bevanda in lattina, 98
Bibbia dei Costruttori di case, 74
bici, 287
bicicletta, 132, 141, 294
bio-etanolo, 227
bio-etanolo cellulosico, 227
bio-metanolo, 227
biocarburante, 316
    barbabietola da zucchero, 317
    bioetanolo cellulosico, 317
    canna da zucchero, 317
    colza, 316
    da alghe, 319
    dal mais, 317
    densità di potenza, 316
biocarburanti, 48, 85
    produzione, 227
biocombustibile
    jatropha, 318
biodiesel, 48, 227
    da alghe, 318
biodiesel di colza, 316
bioetanolo
    canna da zucchero, 317
    da barbabietola da zucchero, 317
    dal mais, 317
    sottoprodotti, 317
bioetanolo cellulosico, 317
biomassa, 49
    combustione combinata, 236
    piantagione, 236
    resa, 55
biomasse, 43
bird, 300
Birmingham, 229
bistecca, 84, 87
Blair, Tony, 236, 246, 256
Blocco, 363
BMW, 34, 289
    Hydrogen 7, 143, 154
boat, *vedi anche* ship
Boeing 747, 141
bollitore, 56
bollitori, 57, 218
Boltzmann, 304
bomba, 112
Bombardier Q400, 41
bombe, 111
boro, 22, 224, 232
borsa europea di scambio delle emissioni, 250
boschi cedui a breve rotazione, 55
BP, 4, 32, 241
Brinkley, Mark, 74
BritNed, 219
Brown, Gordon, 25
Brutta Cosa, 12
BTU, 372
burro, 34, 36
    potere calorifico, 34
bus
    elettrico, 132
bus elettrico, 132
bus marino, 133
Bush, George W., 48

C5, 74, 140
caffè, 372
Caithness, 299
Calcestruzzo, 363
calcio, 218
caldaia a condensazione, 327
California, 201
calma piatta, 206
calore, 12
    scoria, 161
calore di scarto, 108
Caloria, 371
Calorie, 83
calorie, 371
Caltech, 2
cambiamento climatico, 6, 7, 12
    non far niente, 267
    minaccia più grande del terrorismo, 5
    produzione di energia, 6
cambiamento dello stile di vita, 156
cambio batterie, 291
Cambridge, 50, 59, 100
Camera dei Lord, 253
camini, 160
camino
    solare, 202
camino solare, 202
cammina, 86
campagna, 231
campionato britannico dello spreco di energia, 75
campioni di ghiaccio, 7
campo del confronto magico, 4
Canada, 25, 261, 263
Canale di Bristol, 93
candela d'accensione, 50
cane, 86
canna da zucchero, 55
cannuccia, 106
capacità, 70, 297
capacità termica, 56, 337
capire, 19
carboidrato, 49
carbon neutralization, 4
carbon offset, 4
carbone, 9, 104, 317
    chiusura dele centrali, 383
    densità di energia, 221
    potere calorifico, 221
    pulito, 225, 236
    Regno Unito, 175
carbone fossile, 228
    contiene uranio e torio, 194
    radiazione nucleare da, 186
carbone inglese, 7, 8, 10
carbone minerale, 179
carbone mondiale, 7, 8, 10
carbone pulito, 225, 236

carbone sostenibile, 175
carburanti
    densità energetica, 34
    potere calorifico, 34
carburanti fossili
    picco di produzione, 6
carburanti liquidi
    da piante, 316
Cardiff, 93
caricabatteria, 5, 79
caricabatterie, 75, 76, 79
caricabatterie del telefono, 75
carichi di congestione, 149
carne, 84
carnivoro, 84
carta, 98, 104, 317
cartacei, 360
cartone, 317
casa, 328, 369
Casa passiva, 333
case, 4
cat, 71
catamarano, 141, 312, 315
cattura del carbonio, 236
cattura e sequestro del carbonio, 174
cattura e stoccaggio del carbonio, 267
cavalli, 33
cavallo, 86
CCS, 174, *vedi anche* carbon capture and storage
cella a combustibile
    a carbone diretto, 175
cella a combustibile a carbone, 175
cella a combustibile a carbone diretto, 175
celle a combustibile
    autobus, 143
cellulare, 75
cellulosa, 104
Celsius, 323, 368
Cemento, 363
centrale, 114
centrale a carbone, 174
centrale solare, 197
centrale termoelettrica a paglia, 320
Centrale termoelettrica di Elean, 322
centrali a carbone, 6
    chiusura, 6
centrali a petrolio, 6
centrali elettriche, 6, 31, 370, 383
    carbone, 370
centrali elettriche a carbone, 370
centrali nucleari, 75
centrali solari, 46
ceramiche, 97
cerchio, 293
Certificati Obbligazionari per le Rinnovabili, 73
Cessna, 141, 305
CFL, 66
cherosene
    densità di energia, 221
    potere calorifico, 221
chi inquina paga, 16
chiatta munita di gru, 230
chiatta per il sollevamento, 239
chiatte con gru, 70, 74
chiazze, 245
chilocaloria, 371
chilotone, 112
chilowatt, 57
chilowattora, 29
chilowattora al giorno, 29
chiocce, 85
CHP, 161
cibo, 43
    rifiuti, 241
    sprecato, 48
cibo sprecato, 54, 241
ciclista, 294
ciclo Atkinson, 150
ciclo di vita
    manufatto, 97
ciclo Otto, 150
ciminiera, 174
Cina, 7, 25
circolazione degli oceani, 270
circolazione oceanica, 270
circolazione termosalina, 270
circoli viziosi, 271
circolo vizioso, 271
Citroën Berlingo, 140
civilizzazione, 56
Clarkson, Jeremy, 139
CO_2, *vedi* carbon dioxide
coalizione dei volenterosi, 271
Coca Cola, 98
coefficiente di dispersione termica, 155, 156
coefficiente di perdita di calore, 329, 330, 332
coefficiente di prestazione, 163, 326, 335
coefficiente di rendimento, 171
coefficiente di resistenza, 282
coefficiente di resistenza aerodinamica, 151, 283
coefficiente di resistenza aerodinamico, 284
coefficiente globale di scambio termico, 326
cogenerazione, 161
coke, 104
Colorado, 319, 322
coltivazioni energetiche, 48
colture, 320
colza, 316
combustibile
    densità di energia, 221
    potere calorifico, 221
combustibili fossili, 225
    riserve di sicurezza per il vento, 207
combustione, 36
combustione combinata di biomassa, 235
Commissione per lo Sviluppo Sostenibile, 117
Commissione per lo sviluppo sostenibile, 3
compensare, 250
compensazione del carbonio, 250
computer, 75, 76, 99, 104
    fabbricazione, 104
computer portatile, 77
concentratore fotovoltaico, 201
condensa, 331
conducibilità, 340
conducibilità termica, 337
confini, 35
confusione
    potenza e efficienza, 53
    potenza ed energia, 29
congelata, 98
congestione, 137
congestione del traffico, 137
conservazione dell'energia, 31
consumi
    europei, 115
consumo, 26
consumo di carburante, aeroplano, 41
consumo di gas, 384
consumo di petrolio, mondo, 318
container, 373
contatore del gas, 375
continente, 107
contrazione e convergenza, 17
contribuente, 4
controllo del flusso laminare, 306
conversione, 411
conversione dell'energia, 114
conversione unità di misura, 375
CoP, 163
Cornovaglia, 100
Coronation Street, 218
corrente, 92
correnti, 92
costa, 240
costi
    armi, 244
    eolico, 74

eolico offshore, 73
smantellamento nucleare, 194
costi ambientali delle fonti rinnovabili, 28
costi della pulizia nucleare, 194
costi economici, 28
costi sociali, 28
CPV, *vedi* concentrator photovoltaics
credenza
affidabilità del vento, 223
crescita della popolazione, 10, 127
crescita popolazione, 8
Croesor, 223
crosta, 106
Cruachan, 211
CSP, *vedi* concentrating solar power
cucchiaino da tè, 76
cucinare, 56, 230
Curtis, Jamie Lee, 144
CUTE, 143
cv, 374

Danimarca, 30, 39, 71, 218
Dart Fener, 75
dati
altezza, 61
auto elettrica, 140
batimetria, 68
capacità di generazione elettrica, 383
chiusura centrali elettriche, 6
concentrazione CO_2, 7, 10
combustibili fossili, 384
consumi energetici, 116, 257, 378
consumo di calore, 156
consumo di gas, 384
consumo di petrolio, 318
deficit energetico, 383
densità di popolazione urbana, 169
discariche, 229
domanda di elettricità, 383
emissioni, 18
emissioni delle automobili, 150
emissioni gas-serra, 377, 378
eolico offshore, 72
esposizione solare, 264
fluttuazioni della potenza eolica, 208
fotovoltaico, 45
G-Wiz, 140
idroelettricità, 384
importazioni, 361
importazioni di carbone, 384
incenerimento, 229
insolazione, 43, 50
intensità del carbonio nei combustibili, 376
intensità del carbonio nella produzione di elettricità, 376
legno, 317
merci, 101
nucleare, 384
Paesi, 379
pendolari, 35, 140, 151
PIL, 116, 257, 377
popolazione, 10, 379
potenza nucleare Paese per Paese, 178
potere calorifico, 317
prezzo petrolio, 6
produzione carbone, 7, 10
produzione di carbone, 8
produzione di carbone fossile, 384
produzione di elettricità, 383, 384
produzione di paglia, 320
produzione di petrolio, 8
produzione petrolio, 6, 7, 10
profondità, 68
profondità dei mari, 68
profondità delle acque, 68
richiesta di gas, 222
riciclo, 229
rifiuti, 229
stoccaggio mediante pompaggio, 223
superficie, 379
vento
Cairngorm, 37
Cambridge, 37, 39
Irlanda, 208
DD, 191
decadimento degli elementi radioattivi, 106
decentralizzazione
micro-turbine, 70
decoder, 75
deficit energetico, 383
definizione
sostenibile, 174
Delaware, Università del, 54
deliberato grado di errore, 19
densità, 36, 293
densità della popolazione, 38
densità di energia
batteria agli ioni di litio, 221
batteria piombo-acido, 221
carbone, 221
cherosene, 221
combustibile, 221
etanolo, 221
gasolio, 221
idrogeno, 221
legna da ardere, 221
metanolo, 221
propano, 221
densità di popolazione, 196, 236
urbana, 169
densità di potenza, 46
biocarburante, 316
colza, 316
eolico, 294
eolico offshore, 67
fotovoltaico, 53
idroelettricità, 61, 62
idroelettrico nelle terre alte, 62
miscanthus, 49
pannelli per acqua calda, 44
parco eolico, 37
piante, 49
solare a concentrazione, 197, 203
Sole, 43
tutte le energie rinnovabili, 196
tutte le rinnovabili, 123
densità energetica, 34, 36, 317
burro, 34
carburanti, 34
desalinizzare, 102
desalinizzazione, 102, 103
deserto, 197
Diamond, Jared, 196
diesel, 36
Diga, 61
Dinorwig, 211–214, 239, 369
Dipartimento della Difesa, 113
dipendenza, 225
dire di no, 278
dire no, 120
dirigibile, 313
discarica, 97, 228, 229
discariche, 48
distanza media percorsa, 36
distanza percorsa
media, 36
Distretto Geotermico di Southampton, 109
diversità, 230
dobbiamo avere un piano che funzioni, 181
docce, 56
doccia, 57
domanda
elettricità, 206, 383
domanda dinamica, 217
doppi vetri, 156, 328
dormire, 76
Dounreay, 180
Drax, 370
DT, 191
Dynamic Demand, 224

e, 374
e500, 152
EastEnders, 218
Eco Cute, 171
eco-barca, 143
economia, 34, 73, 225, 234
economie di scala, 39
economista, 2
EdF, 6, 383
edifici
legislazione, 325
edificio
casa tipica, 155
consumo termico, 155
dati, 156
Heatkeeper, 332, 334
inerzia termica, 341
parametro di perdita di calore, 328
perdita, 328
standard, 160
ufficio efficiente energeticamente, 333
Università di Cambridge, 333
edifico
consumo di calore, 323
EEStor, 221
effetto serra, 7, 12
efficienza, 127, 212, 223
aerei più efficienti, 42
confusa con la potenza, 53
dei pannelli solari, 53
dell'incenerimento, 50
delle piante, 55
miglioramenti, 47
per lo sviluppo, 26
efficienza aerodinamica, 305
efficienza energetica, 66
efficienza legislativa, 170
Eggborough, 370
Einstein, 308
Eisenhower, D.D., 111, 147
ekranoplano, 314
electric car
range, 290
Elettrica, 140
elettricità, 56, 76, 225
fornitura, 56, 144, 226, 383
energy gap, 6
gestione della domanda, 217
idroelettrico, 61
la domanda varia, 207
rendere verde, 144
rete, 219
rete elettrica, 217
elettricità dalla rete principale, 217
elettrificazione
del riscaldamento, 227
del trasporto, 226
eleusine coracana, 55
elicottero, 141
elio, 313
eliostati, 204
emissioni
nella produzione di elettricità, 376
nei combustibili, 376
volare, 19
emissioni di anidride carbonica
auto elettrica, 144
energia, 29
bassa qualità, 44
chimica, 36
cinetica, 33
conservazione, 31
della vaporizzazione, 36
geotermico, 106
onda, 343
spesa, 240
energia chimica, 31, 32, 36
energia cinetica, 33, 283, 293, 343
energia di bassa qualità, 44
energia e potenza
al confronto, 29
energia elettrica, 32
energia eolica, 37
energia geotermica, 31, 106
Energia immagazzinata
automobile, 362
energia immagazzinata
edificio, 364
legno, 363
materiali da costruzione, 363
metallo, 363
roccia, 363
vetro, 363
energia incorporata
acciaio, 104
acqua, 105
alluminio, 104
automobile, 104
energia lunare, 90
energia necessaria, 81
energia nucleare, 4, 22
energia potenziale, 343
energia solare, **43**
concentrazione, 46
energia solare a concentrazione, 46
energia sostenibile
costi mbientali, 28
costi sociali, 28
energie rinnovabili
ricerca e sviluppo, 244
Enigma, 86
entropia, 31, 102
eolico, 233, 261
a confronto con le maree, 95
costi, 74
micro-eolico, 70, 74
offshore, 67
chiatte con gru, 70
chiatte munite di gru, 230
chiatte per il sollevamento, 239
costi, 73
densità di potenza, 67
London Array, 73
offshore in acque profonde, 69, 72
eolico in alto mare, 67
eolico offshore, 72
chiatte con gru, 70
chiatte munite di gru, 230
chiatte per il sollevamento, 239
costi, 73, 74
dati, 72
fattore di carico, 299
in acque poco profonde, 67
in acque profonde, 67
eolico offshore in acque poco profonde, 67
equatore, 43
erba, 48
escrementi di gallina, 48, 320
esportazioni di armi, 244
esposizione solare
dati, 264
Estonia, 25
estrazione
carbone, 175
geotermica, 107
estrazione del carbone, 175
estrazione geotermica, 107
estrazione geotermica avanzata, 108
estuario del Severn, 93
estuario del Tamigi, 72, 90, 92
etanolo, 48
dal mais, 317
densità di energia, 221
potere calorifico, 221
Etheridge, D. M., 23
etica, 13
inquinamento, 16
reattori autofertilizzanti, 180
ettaro, 273
Europa, 49, 115, 119, 229, 260
continentale, 161, 162, 369
Europa continentale, 161, 369
European Wind Energy Association, 263
EV1, 151
Evans, R. Keith, 154
Exxon, 241

fabbisogno energetico di processo, 362
fabbrica, 97
fabbricazione, 75, 104
facilmente accendibile e spegnibile, 206
Fai-da-te per riparare il Pianeta, 79
Fair Isle, 219
fallacia
    Limiti dello Sviluppo, 193
fallacy, *vedi anche* myth
falsa credenza
    borsa del carbonio, 250
    camminare, 87
    cibo, 87
    compensazione, 250
false credenze
    pannelli solari, 51
fare la propria parte, 4
fattore di capacità, 38, 298
fattore di carico, 38, 72, 73, 298, 299
fattori economici
    del vento, 39
Fener, Dart, 75
ferrovia, 287–289
fertilizzanti, 49, 55, 85–87
Fetish, 152
FEU, 373
Ffestiniog, 211, 212
Fibra di vetro, 363
Fido, 86
filobus, 132
finesse, 305
finestra, 328
Finlandia, 231, 239
Fischer, Joschka, 196
fisica, 35
    conservazione dell'energia, 31
    leggi di Newton, 300
fisico, 2
fiume, 161
    uranio, 182
fiume Deben, 90
Florø, 349
flussi di marea, 228
flusso, 29, 92
flusso di calore, 107
flusso, luce solare, 43
fluttuazioni, 206, 227, 233
fonti rinnovabili locali, 335
foreste, 227, 261
forma affusolata, 283
formaggio, 83
formula
    energia cinetica, 35
Formula Uno, 374
fornelli, 56, 57
fornello, 56
forno, 57
forza di Coriolis, 90
forza gravitazionale, 106
Fossett, Steve, 309
fotosintesi, 49, 319
    efficienza, 55
fotovoltaico, 43, 44
fotovoltaico a concentrazione, 201
fotovoltaico a giunzione multipla, 53
fotovoltaico solare
    l'impianto più grande del mondo, 54
Foyers, 211
francese, 234
Francia, 25, 190, 231, 232, 349
frattale, 73
freezer, 56
frenata rigenerativa, 137
frenata, rigenerativa, 137
freni, 283
Friends of the Earth, 22
frigoriferi
    e gestione della domanda, 217
frigorifero, 163
frigorifero combinato, 56
frigorifero, fabbricazione, 104
frigorifero-congelatore, 76
fungo, 58
fusione al deuterio, 191
fusione al litio, 191

g, 344
G-Wiz, 139, 140
    dati, 140
Gaia, 3
Galles, 61, 67, 72, 85, 212, 299
gallone, 371
gap di energia, 6
gas, 228
    discarica, 321
    metano, 321
    richiesta nazionale, 222
gas ad effetto serra, 12
gas di discarica, 321
gas GPL, 104
gas naturale, 228, 321
    richiesta nazionale, 222
    varizioen della domanda, 222
gasdotto, 70, 243
gasolio
    densità di energia, 221
    potere calorifico, 221
gatti, 114
gatto, 86
General Motors, 143, 151
generazione a doppio effetto, 347
generazione nei due sensi, 347
geoingegneria, 267
geotermia
    Islanda, 203
geotermica
    avanzata, 108
    rocce calde anidre, 109
geotermiche, 227
geotermico, 264
geotermicol
    magma, 109
Germania, 25, 38, 39
gesso, 363
gestione della domanda, 217, 218
gestione della richiesta, 209
gestione responsabile delle scorte, 244
GHG, *vedi* greenhouse gas
ghisa grezza, 10
Giappone, 25, 159, 166, 192, 299, 379
    efficienza legislativa, 170
giardino, 163
giga-watt, 30
giga-wattora, 30
gigatonnellata, 268
gigawatt, 208
giocattoli, 75
giornale, 104
giornali, 317, 321
giornalismo irresponsabile, 11
giornalismo, cattivo, 11
giornalisti, 75, 154
giornata nuvolosa, 51
girare verso il basso, 171
Giza, 373
Glasgow, 38
Glendoe, 63
GlobalFlyer, 309
glorificazione dei viaggi, 5
GM, 143
GM EV1, 151
gmt, 280
gnuplot, 280
Gomma, 363
Goodstein, David, 2
Google, 265
gradi giorno, 326, 327
grado di errore, deliberato, 19
grado di perdita di calore per convezione, 325
grafico a forma di mazza da hockey, 23
Gran Bretagna, 102
    altezze, 61
    domanda di elettricità, 206, 383
    precipitazioni, 61, 62
    richiesta di elettricità, 209
Gran Bretagna "versione fumetto", 128
Gran Bretagna versione fumetto, 226
    2008, 128
granite, 336

Granito, 363
granito, 336, 337
grano, 320
granturco, 55
gravità, 344
Great Yarmouth, 299
Greenpeace, 5, 22, 178, 233, 263, 300
greggio, 23, 228
    produzione, 6
Gretar Ívarsson, 107
Grubb, Michael, 250
guerra, 111
    alla droga, 243
    Iraq, 244
guerra in Iraq, 244
guerre, 244
guerriero solare, 45
guida, 86

Haishan, 359
Hammerfest, 92
Hansen, Jim, 276
Hawaii, 7
Heathrow, 241
Heatkeeper, 331, 332, 334
Heaton, Emily, 49
Heliodynamics, 45, 54
Helm, Dieter, 360
Helston, 100
Herne Bay, 67
HEU, 113
Honda, 36, 154
    auto a celle a combustibile, 144
    FCX Clarity, 144
Horns Reef, 68, 73
hp, 374
Hummer, 143
HVDC, 198, *vedi* high voltage DC
HyperCar, 153

i MiEV, 151
idrati di metano, 271
idraulica, digitale, 138
idrocarburi, 34
idrocarburo, 36
idroelettricità, 61, 229, 263
    Islanda, 203
    terre alte, 62
idroelettrico nelle terre alte, 62
idrogeno, 143, 319
    boro, 224
    aereo, 310
    costo energetico, 154
    da alghe, 319
    dai batteri, 48
    densità di energia, 221
    e potenza eolica, 217
    efficienza di stoccaggio, 217
    potere calorifico, 221
    produzione grazie all'energia nucleare, 193
IKEA, 172
il grasso è 6000 metri al secondo, 308
Il mondo in riserva, 2
Il parco eolico Kentish Flats, 74
imballaggio, 97
imbarcazione
    propulsione nucleare, 147
imbarcazioni come aerei, 311
immagazzinamento dell'energia cinetica, 219
impianti di pompaggio, 211
    efficienza, 212
impianti stereo, 76
impianto di pompaggio
    efficienza, 223
Impianto di produzione di calore del Distretto Geotermico di Southampton, 110
impianto di stoccaggio, 212
impianto idraulico a controllo digitale, 138
impianto-laguna, 234
importato, 360
importazioni
    carbone, 384
    energia, 232, 234
importazioni di carbone, 384
imprecisione, deliberata, 19
in mare aperto ed in acque profonde, 72
in uscita, 56
incenerimento
    efficienza, 50
incenerimento dei rifiuti, 30, 48, 228, 229, 236
    efficienza, 236
incenerimento di rifiuti domestici, 48
incertezza, 13
incorporata, 98
Independent, 11, 23, 74
Indermuhle, A., 23
India, 25, 183, 263
inerzia termica, 341
infrarossi, 12
ingegnere, 36
ingegneria genetica, 50
Inghilterra, precipitazioni, 61
Inghilterra–Francia interconnessione, 203
iniziare a costruire, 278
inquilino, 252
inquinamento, 66
insolazione, 43, 50
intensità di carbonio, 360
interconnessione
    Inghilterra–Francia, 198, 203
    Islanda, 203
    Norvegia, 219, 230
interconnessione Inghilterra–Francia, 232
intermittenza, 69
internet, 25
Intonaco, 363
invasione nazista, 120, 124
inverno
    pompe di calore, 169
investimenti, 240
ioni di litio, 152
IPCC, 42, 187, 277
Irlanda, 80, 207, 208, 223, 349
    fornitura eolica, 208
Irlanda del Nord, 93
irraggiamento diretto, 199
irrigazione, 49
Isaac Asimov, 127
Islanda, 106, 107, 203, 205, 219
Islay, 82
isola
    nucleare, 193
isola di Jersey, 346
isolamento, 156, 227
isolamento da spifferi, 324
isolamento dei sottotetti, 156
isolamento nelle intercapedini dei muri, 157
isolante, 330, 331
Isole Britanniche, 91
Isole Scilly, 91
ITER, 191

J-Power, 215
jatropha, 318
Jersey Water, 103
JET, 221
Jevons, William Stanley, 23, 174, 175, 206
joule, 368
jumbo jet, 304
Jutland, 73

Kazakhstan, 379
Kazakistan, 197
kcal, 83, 371
Keeling, C. D., 23
Kemp, Roger, 149
Ken, 79, 171
Kentish Flats, 67, 72, 239
King, David, 253, 276
Kinlochewe, 61, 62
Krusciov, 314
kW(e), 374

kWp, 374

λ, 344
L'ambientalista scettico, 2
l'amplificatore di energia, 184
l'energia nucleare, 2
la marea è come il vento, 352, 353
La Rance, 93
la superficie a persona, 37
lagune, 228
lagune per le maree, 94
lagune usate come bacini mareomotori, 359
laminatoio, 81
lampadina, 66
    ad incandescenza, 65
lampadina fluorescente, 66
lampadine
    a basso consumo, 65
    LED, 65
lampadine fluorescenti compatte, 66
lampione, 66
lana di vetro, 363
Langeled, 70, 243
Larry, 252
latte, 83
lattina, alluminio, 98
lavaggi di piatti, 56
lavaggio, 57
lavaggio dei vestiti, 57
lavaggio delle stoviglie, 57
lavaggio vestiti, 56
lavanderia, 56, 57
Lawson, Dominic, 11, 23
LCA, *vedi* lifecycle analysis
LCD (schermo a cristalli liquidi), 77
Learjet, 141, 306
LED, 66, 228
legge fisica
    onda, 343
Leggett, Jeremy, 254
leggi della natura
    conservazione dell'energia, 31
legna, 55
legna da ardere
    densità di energia, 221
    potere calorifico, 221
Legno, 363
legno, 49, 317
Legno dolce, 363
legno dolce, 317
Legno duro, 363
legno duro, 317
Legno lamellare, 363
Legno laminato, 363
Lego, 97
lettori DVD, 76
lettura del contatore, 375
LEU, 113
Lexus, 139
    pubblicità ingannevole, 139
Liberal Democratici, 233, 236
Libia, 196, 379
Lightning, 151
limite di Shockley–Queisser, 53
Limiti dello Sviluppo, 193
linea costiera, 73
linee di trasmissione, 234
litanie, 12, 24
litio, 154, 191, 195
litio-sulfuro, 224
litio-titanato, 151
litorale, 81
litro, 372
Livingstone, Ken, 171
Llyn Stwlan, 212
Loch Lomond, 213, 214
Loch Sloy, 62, 214
Lomborg, Bjørn, 2
London Array, 73
Londra, 79, 171, 229, 241
Loremo, 152
Los Angeles, 3
Lovelock, James, 2, 3
luci stradali, 66
luci, sulle automobili, 64
lumen per watt, 65, 66
Lun, 314
luna, 89, 90, 106
lunghezza d'onda, 343, 344
Lussemburgo, 25

Mühlhausen, 46, 54
macchia, 200
macchina a vapore, 7, 8, 10
macchine termiche, 161
maglioni resistenti, 227
magma, 109
maiale, 84
mais, 320
maiuscole, 30
Malin Head, 349
malvagi, 75
mangiacassette, 77
mangiare carne, argomento a favore, 85
mangime, 84
Manzanares, 202
manzo, 84
Maplin, 75
mappa, 13
Marchetti, C., 193
Mare del Nord, 80, 91
    petrolio, 6
marea, 90, 263
    generazione nei due sensi, 347
    negli oceani, 90
    onde, 348
marea di quadratura, 93
maree
    a confronto con l'eolico, 95
    spiegazione, 89
maree di quadratura, 89
maree equinoziali, 89
maree sigiziali, 93
margarina, 34
Mastrandrea, 17
Mattone, 363
Mazda, 145
McCarthy, Donnachadh, 74
McMahon, Richard, 79
Medioevo, 120
Mega City, 152
megatone, 112
mele, 287
melma, 319
membrana, 102
merci, 362
    consumo di energia, 101
merci su strada, 101
mercurio, 65, 66
messa in sicurezza degli approvvigionamenti energetici, 6
Messico, 261
metalli, 97
metano, 48, 229, 321
metanolo, 232
    densità di energia, 221
    potere calorifico, 221
metapost, 280
metri cubici, 375
metro, 368
Metropolitana di Londra, 149
micro-cogenerazione, 161
micro-eolico, 70
micro-generazione, 70, 298
micro-turbina, 298
micro-turbine, 70
microonde, 56, 57
migrazione, 310
miliardi, 240
    smantellamento nucleare, 194
miliardo, 13, 369
milione, 369
militare, 244
militari
    aiuti, 244
mini-SUV, 152
mini-turbine, 298
miniera
    carbone, 179

miniere di carbone, 231
Mio, 369
miscanthus, 49, 55, 227
miscanto, 316
miscelamento, 102
misuratore di potenza, 75
MIT, 108, 109
mito
  gli aerei dovrebbero volare più lentamente, 300
  idroelettricità, 63
  inefficienza delle auto, 131
  nuovi aeroplani di gran lunga più efficienti, 146
  tasso di costruzione delle centrali nucleari, 190
Modec, 153
modelli del clima, 13
modello
  pala eolica, 294
  potenza eolica, 293
modello schematico
  auto, 282
  bicicletta, 288
  treno, 289
modello semplificato
  volo, 301
modello semplificato di volo, 304
modem, 75
modificazione genetica, 319, 322
modificazioni genetiche, 49, 55
monazite, 183
Mondo, 116
mondo, 20, 244, 257, 377–379
montone, 85
Moore, Patrick, 178
motivazioni, 6
moto d'acqua, 141, 143
motocicletta, 13
motore a benzina, 150
motore Stirling, 203
motoscafo, 143
Mrd, 369
Mt, 369
Mtep, 369
mucca, 83, 84, 87
mulini a vento
  subacquei, 91
mulini a vento subacquei, 91
MW(e), 374
MWp, 374
MyCar, 152
myth
  offsetting, 4

Nanosafe, 151
Nant-y-Moch, 61
narice, 331
naso, 331
nastro trasportatore dell'oceano, 179
nastro trasportatore oceanico, 270
nastro trasportatore, oceanico, 270
National Academy of Sciences, 24
National Renewable Energy Laboratory, 319, 322
nave
  consumo di energia, 101
  nave da crociera, 97
  portacontainer, 100
  propulsione nucleare, 147
  vernice, 4
nave aerea, 313
nave da carico commerciale
  a propulsione nucleare, 147
nave da crociera, 97
nave portacontainer, 100
nebbia, 13
Neftel, A., 23
nemico del popolo, 5
neutralization, carbon, 4
neutralizzazione del carbonio, 235, 250, 272
neutralizzazione, carbonio, 250
neutralizzazione, del carbonio, 272
neve, 271
New Jersey, 262
New Scientist, 5, 22
Newbery, David, 250
Newton, 300
newton, 287, 368
nichel-cadmio, 99, 104
NIMBY, 231
nodi, 92
nolo mare, 147
nomenclatura, 368
Nord America, 260
North Hoyle, 72, 299
Norvegia, 71, 92, 151, 210, 219, 243, 349
NS Savannah, 147
Nuclear Decommissioning Authority, 185, 194
nucleare, 228, 234
  armamenti, 111, 178
  armi
    test, 244
  capacità, 383
  centrale
    costruzione, 187
  chiusura centrali, 6
  chiusura delle centrali, 383
  produzione dell'idrogeno, 193
  reattore
    amplificatore di energia, 184
    autofertilizzante, 180
    ciclo aperto, 179
    fusione, 190
  smantellamento, 241
  stazione
    tasso di costruzione, 190
numeri, 5
Nuova Zelanda, 294
Nuovo Messico, 201

O'Leary, Michael, 41
Ocean Power Delivery, 345
oceano, 89
  estrazione dell'uranio, 182
Oceano Atlantico, 345
  maree, 90
  onde, 81
oche, 310
odio, 5
offsetting, 4
oggetto, 97
ogni piccola azione, 75
ogni piccola azione aiuta, 4, 65
Okinawa, 215
Ola, 343
Olanda, 223
olivine, 274
Olkiluoto, 239
Ombromanto, 86
onda, 343, 344
  acqua poco profonda, 348
  acqua profonda, 343
  marea come onda, 348
  Ola, 343
onde, 80
  produzione da barche, 101
  sorgente delle, 80
onde di marea, 91
Orcadi, 90, 299
ore di Sole, 50
ortografia, 368
orzo, 320
osmosi inversa, 102, 103, 217, 346
ossidi di azoto, 41
ossido di torio, 183
ossigeno, 304
Oxygen Cargo, 153
Oyster, 346
ozono, 41

p, 374
p-km, 130
Paesi, 116, 257, 377, 378
  civilizzati, 56
paesi, 20
paesi stranieri inaffidabili, 6
paglia, 322, 363
palla da biliardo, 89

pallone, 313
panico verga, 55, 317, 318
pannelli fotovoltaici, 51
pannelli solari, 45
    in una giornata nuvolosa, 51
pannelli solari termici, 337
Pannello di compensato, 363
Pannello di fibre di legno di densità media , 363
Pannello di truciolato di legno, 363
Pannello duro di legno, 363
Pannello in cartongesso, 363
panzerotto ripieno della Cornovaglia, 100
parco
    solare, 230
parco eolico, 37, 240
    Whitelee, 38
parco eolico di Whitelee, 38
parco-onde, 81
parete, 328
Partito Conservatore, 126
Partito dei Verdi, 233
pascolo, 85
passeggero-chilometro, 130
patatine, 88
Patella, 82
pecore, 85
pedante, 73
pedanti, 36
Pelamis, 81, 230, 345
pendolari, dati, 35, 140, 151
perdita, 326, 328
perdite termiche, 156
periodo, 343
personalità sexy, 227
pesce, 151
peso, 287
PET
    energia incorporata, 104
petagrammo, 369
petrolio, 228
    Mare del Nord, 6
    prezzo, 6
petrolio saudita, 10
Pg, 369
Phoenix SUT, 152
pianeta
    distruzione, 75
pianeta Dorkon, 34
piano, 181
Piano D, 230
Piano E, 234
Piano G, 233
Piano L, 232
Piano M, 237
piano M, 239
Piano N, 231
piante
    C3, 55
    C4, 55
    più efficienti, 55
piante ad alto contenuto energetico, 316
piante C3, 55
piante C4, 55
piattaforma continentale, 90
piattaforma Magnus, 70
piattaforma petrolifera, 67
piattaforme continentali, 271
piattaforme petrolifere, 72
piazzetta, 262
picco, 297
picco di estrazione del petrolio, 2
picco di petrolio, 23
picco nucleare, 2
picco produzione petrolio, 6
piccolo è bello, 179
piedi cubici, 375
PIL, 116, 257, 377
pila, 99
    nichel-cadmio, 99
pila tipo AA, 99
pilota, 309
pinta, 371, 372
pioppi, 227
pioppo, 316
pipì, 102
piramide, 373
piscina, 373
piscina per bambini, 90
pittima, 309
pittima minore, 309
Pittura, 363
Plastica, 363
plastica, 97
plutonio, 112, 113
Pneumatico, 287
politica, 225
polizia del Jersey, 152
pollo, 84, 85
pompa del benzinaio, 374
pompa di calore, 336
pompa di calore aria-aria, 58
pompaggio, 213
pompe di calore, 31, 58, 227, 236, 335
    a sorgente aria, 168
    inverno, 169
pompe di calore aria-acqua, 168
pompe di calore aria-aria, 227
Porritt, Jonathan, 3
porta, 328
portacontainer, 100
portaerei, 244
possiamo avere solo una lunga fila, 352, 353
potenza, 29
    confusa con l'efficienza, 53
    definizione, 29
    del Sole, 43
    standby, 172
potenza dell'acqua, 61
potenza delle maree, 90
potenza di picco, 70
potenza eolica
    veicoli elettrici, 217
potenza FV mondiale, 54
potenza geotermica, 106
potenza importata, 228
potenza mareomotrice, 95
    uso di due bacini, 358
potenza nucleare
    centrale
        combustibile richiesto, 183
    costi, 182, 185
    dati Paese per Paese, 178
    dismissione, 182
    impianto, 180
    non flessibilità, 206
potenza per unità di lunghezza
    marea, 92, 348
    moto ondoso, 81
potenza reattiva, 79
potenza solare mondiale, 46
potenza totale, 38
potere calorifico, 34, 36, 55, 317
    burro, 34
    carbone, 221
    carburanti, 34
    cherosene, 221
    combustibile, 221
    etanolo, 221
    gasolio, 221
    idrogeno, 221
    legna da ardere, 221
    legno, 317
    lordo, 36
    metanolo, 221
    netto, 36
    propano, 221
    rifiuti, 321
potere calorifico inferiore, 36
potere calorifico lordo, 36
potere calorifico netto, 36
potere calorifico superiore, 36
poteri calorifici, 36
power per unit area, *vedi* power density
Powergen, 383
ppm, 277
precipitazioni, 61
premio Eco-Bollocks, 74

presentazione ingannevole, 189
presentazione, confusione, 4
presentazione, ingannevole, 189
President Dwight D. Eisenhower, 111
Presidente Dwight D. Eisenhower, 147
Prestatyn, 72
prezzo del carbonio, 234
primato carbone, 9
Prius, 139, 150
prodotti estetici, 241
prodotto chimico multinazionale, 98
produttori di petrolio, 12
produzione, 145
produzione annua di acciaio, 69
produzione di carbone, 8, 384
produzione di elettricità, 384
produzione di elettricità nel Regno Unito, 383, 384
produzione idroelettrica, 384
produzione mondiale di carbone, 8
produzione mondiale di petrolio, 318
profondità, 68
profondità dei mari, 68
profondità delle acque, 68
profumi, 241
proiettore, 77
pronuncia, 30
propano
    densità di energia, 221
    potere calorifico, 221
propellente per jet, 36
proprietario di casa, 252
ps, 374
PS10, 204
pubblicità, 79, 171
pubblicità ingannevole, 139
pullman a due piani, 3
pullover di lana, 156
punti di arresto, 283
PVC, 363

Qatar, 25
QE2, 141
quadrati nel deserto, 262
quadrato nel deserto, 197
quadrilioni, 372
qualsiasi colore, purché sia verde, 135
quarto, 371
quarzo, 337
quotidiano, 104

radiatore
    elettrico, 58
radiatori, 57
radiazione nucleare
    da centrali a carbone, 186
radiazione solare, 271
Radio, 77
radio digitale, 77
Radiosveglia, 77
Rame, 363
Rance, 93
ranch, 48
Range Rover, 141
Rapley, Chris, 127
rapporto di planata, 305
rapporto portanza/resistenza, 305, 310
Rapporto Stern, 244
rapporto Stern, 256
rappresentazione schematica della Gran Bretagna, 128
Rau, Nick, 22
RAV4, 152
reattore, 184
    veloce autofertilizzante, 180
reattore a fusione, 191
reattore autofertilizzante, 180
reattore nucleare
    veloce autofertilizzante, 180
reattore subcritico, 184
reattori autofertilizzanti, 182
reattori autofertilizzanti veloci, 179
reattori veloci autofertilizzanti, 180
record, volo, 309
recuperare, 81
refrigeratore, 56
refrigerazione, 31
Regno Unito, 20, 25
religione, 218
rendere verde la fornitura elettrica, 144
rendimenti piante, 316
Repubblica Ceca, 25
resa, 55
resa delle piante, 55
resa energetica, 47
    eolico, 47
    solare fotovoltaico, 47
resistenza dell'aria, 130
reticelle per lampade a gas, 183
retroazioni positive, 271
REVA, 139
ricambi di aria, 324
ricambio dell'aria, 331
ricarica, 291
ricarica delle batterie, 219
ricerca e sviluppo, 244
richiesta
    gas, 222
richiesta nazionale di gas, 222
riciclo, 97, 228
    dati, 229
riduzione della popolazione, 5, 127
rifiuti agricoli, 228
rifiuti alimentari, 48, 54
rifiuti solidi urbani, 229, 317
rifiuto, 97
riflettore fresnel lineare compatto, 204
Rijndam, 146
rimanere in attesa, 76
rinnovabili, intermittenza, 206
Riparazioni FAI-DA-TE per il Pianeta, 171
riscaldamento, 225
    a pavimento, 168
    efficienza, 326
riscaldamento a pavimento, 168
riscaldamento globale, 12
riscaldamento solare, 44
rischiesta
    elettricità, 209
riserva nucleare, 244
riunioni, 218
riunioni televisive, 218
rivista Nature, 143, 153
Rivoluzione Industriale, 8, 10
Roba varia, 15, 75, 97
ROC, *vedi* renewables obligation certificate
rocce calde anidre, 108, 109
roccia, 106
Rocky Mountain Institute, 153
Rolls Royce, 42
rompighiaccio, 147
Rosemanowes, 109
rotore, 297
Royal Albert Hall, 372
Rubbia, Carlo, 184
rubinetto, 29
ruota idraulica, 63
Russia, 25, 147, 263
Ryanair, 41

saccenti, 73
sacchetto di patatine, 88
Sahara, 197
Saint-Malo, 93
sali fusi, 197
sali liquidi
    stoccaggio di energia, 197
sali, immagazzinamento del calore, 197
salice, 227, 316
salinità, 270
salsicciotto, 301–303
Salter, Stephen, 149
    anatra, 345
San Francisco, 132
Sandia National Laboratories, 109
Sauven, John, 22
Savannah, 147
SAX-40, 42
sbarco nazista, 298

sbarramenti, 228
sbarramento del Severn, 93
scala Beaufort, 293
scala logaritmica, 9, 10
scaldacqua solare, 264
Scaled Composites, 309
scambiatore id calore, 331
scambio delle emissioni, 240
scambio di calore controcorrente, 331
scarico termico selvaggio, 336
scettici, 7
scettici del cambiamento climatico, 9
schermo, 76
schiavo, 29
schiuma isolante nella cavità del muro, 329
Schwarzenegger, Arnold, 143
scollegare, 79
scoria-calore, 161
Scozia, 72, 92, 213, 219
    precipitazioni, 62
Scroby Sands, 299
scrofe, 85
secondo, 368
segreteria telefonica, 77
SELCHP, 239, 321
semafori, 66
semi, 320
semplificazione, 19
sempre disponibile, 106
sequestro del carbonio, 174, 267
    da combustione combinata, 236
    da combustione combinata di biomassa, 235
serpente di mare, 345
SGA (sistemi geotermici avanzati, 261
Shell, 73, 241
Shell UK, 67
Shetland, 299
shuttle, 243
SI, 368
Siberia, 271
sicurezza approvvigionamento energetico, 122
sicurezza dell'approvvigionamento energetico
    vento, 207
Siegenthaler, Urs, 23
Silent Aircraft, 42
silicati di magnesio, 274
Sinclair C5, 74, 140
Sindaco di Londra, 79, 171
sistemi di potenza a VRB, 221
sistemi informatici, 75
sistemi per l'intrattenimento, 76
Siviglia, 204
Sizewell, 184
slittamento, 272
slittamento del carbonio, 272
smantellamento, 241
Smart, 151
Smith, James, 67
Smola, 71
Snowdonia, 212, 213
soffice, 156
Solarcentury, 254
solare
    concentrazione
        specchi parabolici, 197
    nei veicoli, 145
    parco, 230
solare a concentrazione, 197, 204
    specchi parabolici, 197
solare fotovoltaico, 44
    totale mondiale, 46, 54
solare termico, 264
solare termo-elettrico, 204
Solarpark, 46, 54, 239
Solartres, 204
Sole, 43
sole, 106
Solúcar, 204, 239
sorgo, 55
sostenibilità
    definizione, 174
sostituzione del carbone, 48
sostituzione del petrolio, 48
sottomarino, 313
Spagna, 197, 202
    vento, 223
spazzatura, 11
specchi, 46
specchi parabolici, 197
spegnibili e accendibili, 206
spiaggia, 343
spinta, 305
stadio, 343
stampante, 77
stampante laser, 76, 77
standby, 76, 172
Stati Uniti, 263
stazione di servizio
    attrezzate per vetture elettriche, 291
STE, 204
stendibiancheria, 57
Stiglitz, Joseph, 244
stima, 294
stoccaggio
    energia cinetica, 219
    sali fusi, 197
stoccaggio mediante pompaggio, 94, 211, 233
    efficienza, 212, 223
storia, 120
Strangford Lough, 93
stranieri, 6
Strathclyde University, 224
stufa, elettrica, 57
stupidaggine, 190
Sud Africa, 218
Sudan, 197, 380
suino, 84
superficie frontale, 283
superficie per abitante, 379–382
superjumbo, 146
sussidio, 243
SUV, elettrico, 152
Svezia, 210, 219, 231

t-km, 130
tè, 56, 372
tabella di conversione, velocità, 293
tabella di marcia, 225
tassa, 243
tassazione del carbonio, 371
tasso di cambio, 32
tasso di variazione, 208
tazza, 372
tazze di tè, 372
Team Crocodile, 131
tecnologia, 127
telefono, 75
telefono senza fili, 76
teleriscaldamento, 161
televisione, 114
televisore, 75
temperatura, 56
temperatura richiesta o fabbisogno termico, 326
tenere le luci accese, 75
tenuta stagna, 156
tep, 369, 374
termico, solare, 43
termostato, 5, 156, 171
Terra, 363
    superficie, 373
terra, 12, 89
terre alte, 61
    precipitazioni, 61
terre basse, 61
    precipitazioni, 61
terreno di gioco magico, 189
Tesco, 241
Tesla Roadster, 140
tettuccio, 145
TEU, 105, 373
Texas, 201, 207, 223
Think, 151
tiepide, 31
Tina, 252

tinyURL, ix, 385
titanato di bario, 221
Titanic, 75, 76
TNT, 112
tonnellata, 372
tonnellata-chilometro, 130
tonnellate, 371
torio, 183, 193
    nel carbone fossile, 194
    riserve, 184
    risorse, 183
torre a corrente ascensionale
    solare, 202
torre solare a corrente ascensionale, 202
torri di raffreddamento, 160, 161
tostapane, 56
Toyota Prius, 150
Toyota RAV4 EV, 152
transatlantico, 141, 146
trascinamento, 130
trasformatori, 76
trasmissione, 232
trasmittanza termica, 323
trasporti, 225
    efficienza
        aeroplano, 41
        scooter elettrico, 153
trasporto
    efficienza
        aereo, 305
    efficienza, 86
        auto ecologica, 131
        auto elettrica, 140
        bicicletta, 131, 132, 148, 288
        catamarano, 315
        merci, 101
        treno, 132, 149
    misure di efficienza, 131
trasporto ferroviario, 132
trasporto marittimo, 101, 147
trasporto pubblico, 226
trasporto via mare, 105
TRC (tubo a raggi catodici), 77
treni della Virgin, 371
treno, 130, 132, 141, 287–289
    consumo energetico, 101
    merci, 101
TREV, 152
Trident, 244
tripli vetri, 156
tropici, 55
Tsukuba City, 299
tsunami, 91, 348
tubo di aria, 283
turbina, 161
turbina eolica Brooklyn, 294
Turbine eoliche, 39
turboelica, 41, 141
Two-Seater Renewable Energy Vehicle, 152

Uccelli
    teoria di, 300
uccelli
    volo in formazione, 302
    volo più lungo, 309
uccelli e pale eoliche, 71
uccello
    autonomia di crociera, 308
    velocità, 304
ULS, 113, 192
ultima cosa, 267
umidità, 331
una-volta-e-basta, 179
Unione Europea, 243
unità di lavoro separativo , 113
unità di misura, 28, 369
    conversione, 411
    velocità, 293
University of South Australia, 152
Univesità di Cambridge, 333
uranio, 112, 183, 228
    costo, 182
    depleto, 180
    estrazione da acqua di mare, 182
    estrazione dall'acqua di mare, 193
    nel carbone fossile, 194
    riserve, 2, 179
uranio a basso arricchimento, 113
uranio ad alto arricchimento, 113
URL, *vedi* web pointer
USA, 109, 260
    colture, 55
uso delle maiuscole, 368
USS Akron, 313

Valentia, 349
valore energetico, 236
valore U, 323, 328
vampiri succhia potenza, 172
Vancouver, 132, 133
vapore acqueo, 41, 80
variazioni della domanda energetica, 207
variazioni nella richiesta di energia, 222
Vectrix, 153
vegano, 84
vegetarianesimo, 85
vegetariano, 5, 84
veicoli ad idrogeno, 217
veicoli elettrici, 210, 219, 229
    potenza eolica, 217
veicolo
    elettrico, 139
veicolo elettrico
    al caldo, 145
    al freddo, 145
    costo della batteria, 145
    durata, 145
    RAV4, 152
    rete elettrica, 220
veicolo per consegne, elettrico, 153
velocità, 293, 343
velocità del vento
    Cairngorm, 37
    Cambridge, 37
    dati, 295
velocità dell'onda, 90
velocità della marea, 90
velocità medie giornaliere, 37
ventilazione, 324, 331
vento, 343
    argomentazioni contro, 207
    dati, 37, 39, 208, 295
    intermittenza, 207
    irlandese, 208
    origine del, 80
    Spagna, 223
Venturi Fetish, 152
verità, 75
versione stilizzata, 225
Vestas, 72
vetri, 328
vetri, doppi, 156
Vetro, 363
vetro, 97
via da seguire, 256
viaggi
    emissioni, 19
viaggi aerei
    neutralizzazione, 235
viaggi jet, 235
viaggio
    emissioni, 19
viaggio aereo
    emissioni, 19
Virgin, 309
Viridian Solar, 44
viscosità, 345
VLS-PV, 385
volano, 219
volare
    emissioni, 41
voli
    futuro dei, 235
Volkswagen, 283
volo
    altezza ottimale, 309
    emissioni, 19
    formazione, 302
    myth about going slower, 300

velocità ottimale, 304
volo in formazione, 310
volo in formazione, 302, 310
volo record, 309
volt, 56
volume, 29, 373
unità, 372
volumi, 371
vortice, 302

W(e), 374
Walkers crisps, 88
Wartsila-Sulzer, 291
watt, 75, 368
Watt, James, 7, 8, 10, 368
Wavegen, 82
Weetabix, 48
Weier, Sven, 79
Wellington, 294
Wembley, 372
White, David J., 67
Whitstable, 67
Whorf, T. P., 23
Wicks, Malcolm H., 122
wind
data, 39
Windermere, 213
Windsave WS1000, 74
Woodbridge, 90
Wp, 374

Xebra, 152

Yamal, 147
Yes Minister, 253

Ze-0, 152

Energia sostenibile – senza aria fritta

David JC MacKay

L'autore nel luglio 2008.
Foto di David Stern.

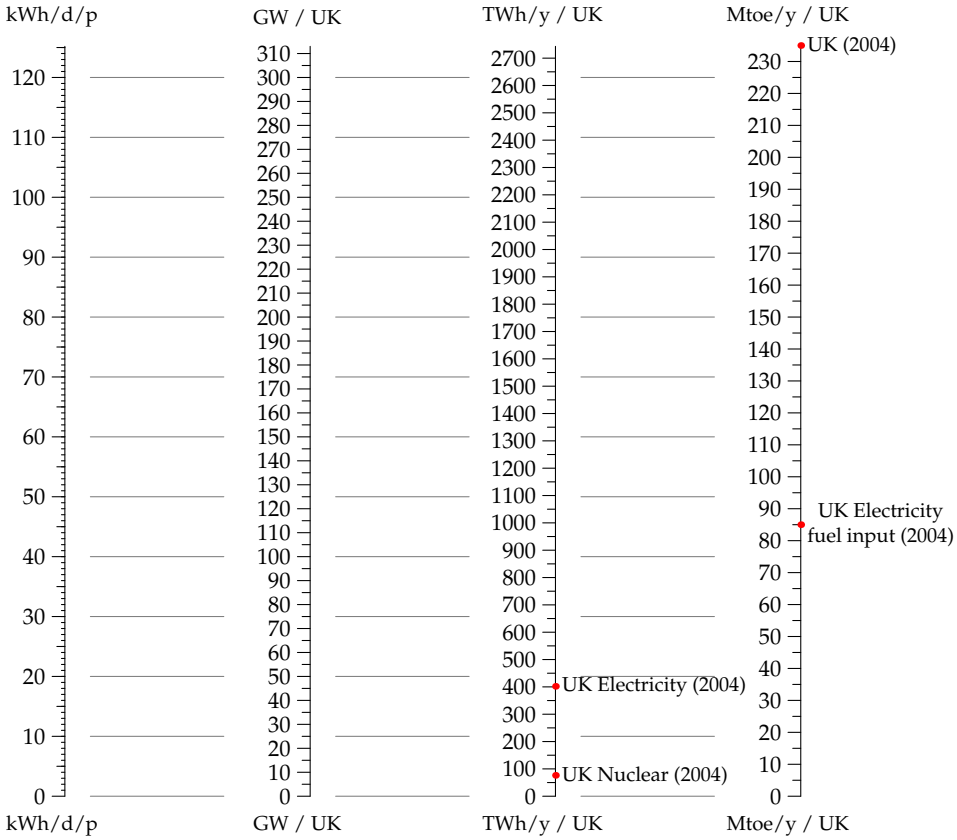
Nota biografica dell'autore

David JC MacKay è dal 2013 *Regius Professor* presso la facoltà di Ingegneria dell'Università di Cambridge, nel Regno Unito, dopo avere lavorato fin dal gennaio 1992 anche come professore di Fisica presso il Cavendish Laboratory. Dopo aver pubblicato on-line nel 2008 il libro "Energia sostenibile – senza aria fritta", è stato nominato il primo ottobre 2009 *Chief Scientific Advisor* per il Ministero dell'Energia e del Cambiamento Climatico, dove tuttora presta la sua opera quattro giorni su sette. Ha studiato *Natural Sciences* presso l'Università di Cambridge e successivamente ha conseguito un dottorato di ricerca in *Computation and Neural Systems* presso Caltech, negli Stati Uniti. A partire dal 2005 ha iniziato a dedicarsi sempre più alla ricerca e all'insegnamento sull'energia. Nella sua vita professionale precedente è stato conosciuto a livello internazionale per le sue ricerche su intelligenza artificiale, teoria dell'informazione e sistemi di comunicazione, incluso l'invenzione di Dasher, un sistema software che permette di comunicare in maniera efficiente in ogni lingua con l'uso di qualsiasi muscolo del corpo. È membro del *World Economic Forum Global Agenda Council on Climate Change*.

Nota biografica dei traduttori

Alessandro Pastore è dal 2011 co-direttore didattico del master MBA internazionale di Alma Graduate School di Bologna in "Green Energy and Sustanable Businesses", e co-titolare del corso "Planning and Launching Green and Sustainable Businesses" presso la stessa scuola. Vive a Cambridge (GB), dove lavora per la società Camfridge che ha co-fondato nel 2004. Ha conseguito il dottorato di ricerca in Ingegneria dei Controlli all'interno dell'ottavo ciclo nazionale e la laurea in Ingegneria Elettronica presso il Politecnico di Torino ottenendo anche l'abilitazione alla professione di Ingegnere. È un ancien élève du Collège des Ingénieurs di Parigi.
Paolo Errani è un Fisico Professionista iscritto all'elenco ANFeA e lavora nell'industria manifatturiera e impiantistica, in ambito energetico. Dopo la laurea in Fisica ed aver praticato qualche anno di ricerca universitaria nel campo dei semiconduttori ha conseguito un master in Ingegneria Nucleare. Nell'a.a. 2013/2014 ha tenuto, a titolo gratuito, le esercitazioni del corso "Planning and Launching Green and Sustainable Businesses" presso Alma Graduate School.
Simone Gallarini è studente del corso di laurea magistrale in Ingegneria Energetica presso il Politecnico di Milano dove ha conseguito a fine 2013 la laurea nella stessa disciplina.

Tavola di conversione della potenza

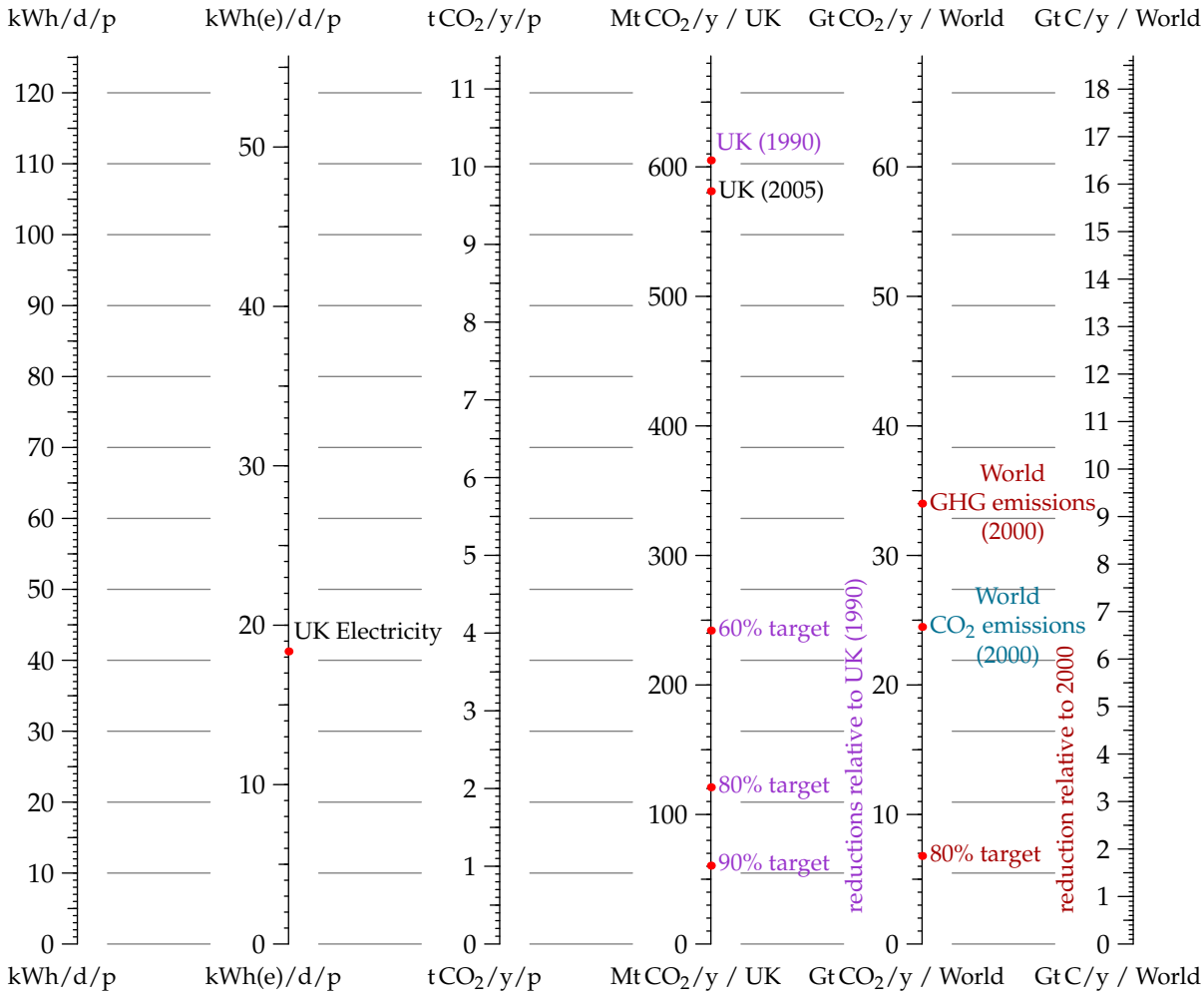


1 kWh/gg	equivale a $^{1}/_{24}$ kW	"Regno-Unito"	= 60 milioni di persone
GW	usato sovente per la '**capacità**' (picco in uscita)		
TWh/anno	usato sovente per l'output di media	Consumi energetici degli Stati Uniti d'America:	250 kWh/gg a persona
1 Mtep	'un milione di tonnellate equivalenti di petrolio'	Consumi energetici dell'Europa:	125 kWh/gg a persona

Le unità di misura di uso più comune nei documenti d'interesse pubblico dove si discute delle varie opzioni energetiche:

terawattora all'anno (TWh/anno).	1000 TWh/anno per Regno-Unito è grosso modo pari a 45 kWh/gg a persona.
gigawatt (GW).	2.5 GW per Regno-Unito sono 1 kWh/gg a persona.
milioni di tonnellate equivalenti di petrolio all'anno (Mtep/anno).	2 Mtep/anno per Regno-Unito sono grosso modo 1 kWh/gg a persona.

Tavola di conversione del carbonio



kWh "tasso di cambio" dell'energia *chimica*:
1 kWh ↔ 250 g di CO_2 (petrolio, benzina) (per il gas, 1 kWh ↔ 200 g)

kWh(e) l'energia *elettrica* è più costosa:
1 kWh(e) ↔ 445 g di CO_2 (gas)
(il carbone costa il doppio in termini di CO_2 [il nucleare, in Francia, un ventesimo. (N.d.T.)])

t CO_2 tonnellate di CO_2

Mt C milioni di tonnellate di carbonio

"Regno-Unito" = 60 milioni di persone
"Mondo" = 6 miliardi di persone

Web site for this book

Register your book: receive updates, notifications about author appearances, and discounts on new editions. ***www.uit.co.uk/register***

Resources for your book: links to further reading, corrections, reviews, commentary by the author on topical issues, and more. ***www.uit.co.uk/resources***

News: forthcoming titles, events, reviews, interviews, podcasts, etc. ***www.uit.co.uk/news***

Join our mailing lists: get e-mail newsletters on topics of interest. ***www.uit.co.uk/subscribe***

Order books: order online. If you are a bookstore, find out about our distributors or contact us to discuss your particular requirements. ***www.uit.co.uk/order***

Press/media/trade: for cover images, or to arrange author interviews, author visits, etc. ***www.uit.co.uk/order***

Send us a book proposal: if you want to write – even if you have just the kernel of an idea at present – we'd love to hear from you. We pride ourselves on supporting our authors and making the process of book-writing as satisfying and as easy as possible. ***www.uit.co.uk/for-authors***

UIT Cambridge Ltd.
PO Box 145
Cambridge
CB4 1GQ
England

E-mail: *inquiries@uit.co.uk*
Phone: **+44 1223 302 041**